

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 12 Sayı: 4 2023
Volume: 12 Issue: 4 2023



www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi
www.ohu.edu.tr/facultyofengineering

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>
<https://dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh>



Dergi Sahibi/Journal Owner

Prof. Dr. Murat Barut

**Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı, Türkiye/
Niğde Ömer Halisdemir University, Dean of Engineering Faculty, Türkiye**

Baş Editör/Editor-in-Chief

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Yardımcı Editörler/Associate Editors

Prof. Dr. Mustafa Korkaç

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Doç. Dr./Assoc. Prof. Dr. Firdevs Uysal

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Doç. Dr./Assoc. Prof. Dr. Ahmet Şakir Dokuz,

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*



Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Adnan Görür

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Prof. Dr. Metin Yıldırım

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Prof. Dr. Murat Gökçek

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye/*Yıldırım Beyazıt University, Türkiye*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/*Hubei University, China*

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Türkiye*

Prof. Dr. Cengiz Duran Atış

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Okan Karahan

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Mustafa Alçı

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Kenan Danışman

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Kezban Candoğan

Ankara Üniversitesi, Türkiye/*Ankara University, Türkiye*

Prof. Dr. Mustafa İlbaş

Gazi Üniversitesi, Türkiye/*Gazi University, Türkiye*

Prof. Dr. Farid Abed

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Ghassan Abu-Lebdeh

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Serter Atabay

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Doç. Dr. Kazi Fattah

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Süreyya Meriç Pagano

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Türkiye/*Tekirdağ Namık Kemal University, Türkiye*

Prof. Dr. Filipe Figueiredo

Aveiro Üniversitesi, Portekiz/*Aveiro University, Portugal*

Editör Kurulu/ Editorial Board

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir (Baş Editör/Editor-in-Chief)	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Prof. Dr. Mustafa Korkaç (Yardımcı Editör/Co-Editor)	Jeoloji Mühendisliği Geological Engineering
Doç. Dr. Firdevs Uysal (Yardımcı Editör/Co-Editor)	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Doç. Dr. Ahmet Şakir Dokuz (Yardımcı Editör/Co-Editor)	Bilgisayar Mühendisliği Computer Engineering
Prof. Dr. Fehiman Çiner	Çevre Mühendisliği Environmental Engineering
Prof. Dr. Hakan Erdem	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Prof. Dr. Saffet Ayasun	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Prof. Dr. Zeliha Yıldırım	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Yonca Yüceer	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan	Endüstri Mühendisliği Industrial engineering
Prof. Dr. Murat Barut	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Prof. Dr. Maciej Dutkiewicz	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Prof. Dr. Bora Timurkutluk	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Prof. Dr. Ali Özgün Ok	Geomatik Mühendisliği Geomatics Engineering
Doç. Dr. Yasin Kabalcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Doç. Dr. Kutalmış Gümüş	Harita Mühendisliği Geomatics Engineering
Doç. Dr. Aydın Yeşildirek	Mekatronik Mühendisliği Mechatronics Engineering
Doç. Dr. Serkan Çayırılı	Maden Mühendisliği Mining Engineering
Doç. Dr. Rahim Hassanzadeh	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Doç. Dr. Hatice İnan	Çevre Mühendisliği Environmental Engineering
Doç. Dr. Arzum Büyükkeklik	Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering
Doç. Dr. Andaç Batur Çolak	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Doç. Dr. Casen Panaitescu	Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Perolium and Natural Gas Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı	Üretim Mühendisliği Manufacturing Engineering



Mizanpaj Editörleri/Composition Layout Editors

Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Arş. Gör. Emre Uçar	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Arş. Gör. Ayşe Erdoğan	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>
Arş. Gör. Kemal Ulusoy	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>
Arş. Gör. Mehmet Yetişen	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>

İngilizce Dil Editörleri/English Language Editors

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Doç. Dr. Hande Baltacıoğlu	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Genç	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Recep Yıldız	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>

Türkçe Dil Editörleri/Turkish Language Editors

Prof. Dr. Hasan Tangüler	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hamdi Muratçobanoğlu	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>



Yazışma Adresi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Koordinatörlüğü, 51240 Niğde/Türkiye

Correspondence Address

Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences Publishing Coordinatorship, 51240 Niğde/Türkiye

E-posta/E-mail: mbdergisi@ohu.edu.tr

İnternet sayfası/Web page: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>

Dergi Bilgisi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NÖHÜ) Mühendislik Bilimleri Dergisi, NÖHÜ Mühendislik Fakültesi tarafından 2012 yılından beri Türkçe veya İngilizce olarak yazılmış Orijinal Araştırma Makaleleri ve Derleme Makaleleri yayınlayan hakemli bir dergidir. Dergi, hiçbir aşamada yayın ücreti talep etmemektedir ve DergiPark sistemi üzerinden ücretsiz erişimli bir dergidir.

Publication information

Niğde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences is a peer-reviewed journal that has published Original Research Articles and Review Articles written in Turkish or English since 2012 by NOHU Faculty of Engineering. The journal does not require any publication fee at any stage and is a free access journal from the DergiPark system.

Özetlenme, Dizinlenme/Abstracting, Indexing



Erişilebilirlik /Accessibility





İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı nişasta kaynakları ile üretilen köfterlerin renk ve tekstür özelliklerinin araştırılması

Investigation of color and texture properties of köfter produced with different starch sources

Hamza Alaşalvar, Hakan Erinç

1037-1041

Research Article /Araştırma Makalesi

Parametric study of nonlinear finite element punching behavior of fiber-reinforced concrete slab

Fiber takviyeli beton döşemenin doğrusal olmayan zımbalama davranışı üzerine parametrik bir çalışma

Mohammed S. Al Jawahery, Mehmet Tolga Göğüş, Rayan Faiz Hadi Boto

1042-1050

Research Article /Araştırma Makalesi

Contribution of residential heating to air pollution in an industrial city of Turkey

Türkiye'nin bir sanayi şehrinde konut ısıtmasının hava kirliliğine katkısı

Zeynep İpek, İbrahim Uyanık

1051-1058

Araştırma Makalesi/Research Article

Mobilya sektöründe satış sonrası hizmetler bölümünde veri madenciliği uygulaması

Data mining application in after sales services department in furniture industry

Ali Karakuş, Mehmet Duran Toksarı

1059-1070

Research Article /Araştırma Makalesi

An advanced Salp Swarm Algorithm for optimization problems

Optimizasyon problemleri için Gelişmiş Salp Sürüsü Algoritması

Bahaeddin Türkoğlu

1071-1078

Research Article /Araştırma Makalesi

Vaporizing foil actuator welding prototype manufacturing and applications risk analysis

Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı prototip imalatı ve uygulamaları risk analizi

Ganime Tuğba Önder, Mustafa Kemal Külekci

1079-1091

Derleme Makalesi /Review Article

Anaerobik parçalanma süreçlerine iz element ilavesi ve etki mekanizmaları

Supplementation of trace elements to the anaerobic digestion and effect on the mechanisms in the processes: A review

Dilan Toprak

1092-1100



Araştırma Makalesi/Research Article

Konya Gençlik Merkezi karbon ayak izi

Konya Youth Center carbon footprint

Mehmet Zahid Büyükcem, Fatma Bedük

1101-1108

Araştırma Makalesi/Research Article

Model tabanlı bir PV emülatör tasarımı ve gerçekleştirilmesi

Design and implementation of a model-based PV emulator

**Ardan Hüseyin Eşlik, Enes Yıldız, İbrahim Güneş, Kübra Kaysal, Mehmet Yalvaç,
Said Mahmut Çınar**

1109-1118

Araştırma Makalesi/Research Article

Derin öğrenme teknikleri ile elmada (Granny Smith) kusur tespiti

Defect detection in apple (Granny Smith) with deep learning techniques

Zeynep Ünal, Tefide Kızıldeniz, Mustafa Özden, Hakan Aktaş, Ömer Karagöz

1119-1129

Araştırma Makalesi/Research Article

Biyogaz üretim süreçlerinde kullanılacak en uygun risk değerlendirme metodolojisinin analitik hiyerarşi prosesi ile belirlenmesi

Determination of the most appropriate risk assessment methodology to be used in biogas production processes by analytical hierarchy process

Rıfat Yıldırım

1130-1140

Araştırma Makalesi/Research Article

Görüntü artırma tekniklerinin cilt kanseri türleri üzerinde evrimsel sinir ağları ile sınıflandırma başarılarının karşılaştırılması

Comparison of the classification performance of image augmentation techniques with convolutional neural networks on skin cancer types

Ömer Özcan, Muhammed Karaaltun

1141-1156

Araştırma Makalesi/Research Article

Tarihi harç örneklerinin çoklu analitik yöntemler kullanılarak incelenmesi: Tyana Roma Hamamı (Niğde-Kemerhisar) örneği

Examination of historical mortar samples using multiple analytical methods: Tyana Roman Bath (Niğde-Kemerhisar) example

Hacer Bilgilioğlu

1157-1167

Araştırma Makalesi/Research Article

Kentsel atıksuda ve atıksu arıtma tesisinde bazı analjezik ve anti-enflamatuar farmasötiklerinin varlığı, giderimleri ve çevresel risk değerlendirilmesi

Presence, removal and environmental risk assessment of some analgesic and anti-inflammatory pharmaceuticals in urban wastewater and wastewater treatment plant

Arzu Ulvi, Senar Aydın, Mehmet Emin Aydın

1168-1175



Araştırma Makalesi/Research Article

Box Behnken istatistiksel deney tasarımının peyniraltı sularının mikrofiltrasyon ile ön arıtımında uygulaması
Application of Box Behnken statistical experimental design to the pretreatment of cheese whey by microfiltration

Ezgi Oktav Akdemir

1176-1184

Research Article/Araştırma Makalesi

Investigation of urban heat island and carbon monoxide change using Google Earth engine in Konya
Konya'da kentsel ısı adası ve karbon monoksit değişiminin Google Earth engine kullanılarak incelenmesi

Duygu Arıkan, Ferruh Yıldız

1185-1193

Araştırma Makalesi/Research Article

Negatif olmayan matris faktörizasyonuna dayalı LncRNA-Hastalık ilişkisi tahmini
LncRNA-Disease association prediction based on nonnegative matrix factorization

Ahmet Toprak

1194-1199

Araştırma Makalesi/Research Article

Balıkesir ili ve çevresinin kinematik özelliklerine bağlı gerilme ve deformasyon alanlarının modellenmesi
Modeling of the stress and strain fields depending on the kinematic properties of Balıkesir province and its vicinity

Nazlı Ceyla Anadolu Kılıç

1200-1218

Research Article/Araştırma Makalesi

Assessment of UV-vis driven CFT-GO based photocatalysis on the conjugative gene transfer mechanism in a pilot plant system
UV-VIS kaynaklı CFT-GO tabanlı pilot ölçek fotokataliz prosesinin konjugatif gen transfer mekanizmasına etkisinin belirlenmesi

Can Burak Özkal

1219-1231

Research Article/Araştırma Makalesi

Investigation of load-displacement behavior of cement-coated geotextile reinforced sandy soils
Çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş kumlu zeminlerin yük deplasman davranışının incelenmesi

Mitat Öztürk, Cafer Kayadelen, Gökhan Altay, Yakup Önal

1232-1238

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye'de üretilen geleneksel gıdalardan pastırma ve sucukların fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve serolojik özelliklerinin belirlenmesi
Determination of physicochemical, microbiological, and serological properties of pastırma and sucuk from traditional foods produced in Turkey

Nuran Erdem, Süleyman Gökmen

1239-1259

Araştırma Makalesi/Research Article

2023 Kahramanmaraş ve Hatay depremlerinin Antakya ve Samandağ ilçelerindeki yapısal etkileri ve çözüm önerileri
Structural effects of 2023 Kahramanmaraş and Hatay earthquakes in Antakya and Samandağ districts and solution suggestions

İsmet Vapur, İlker Fatih Kara, Emre Akın

1260-1270



Research Article/Araştırma Makalesi

Distributed coverage control with mobile robots: A potential game approach

Mobil robotlar ile dağıtık kapsama kontrolü: Bir potansiyel oyun yaklaşımı

Samet Güler

1271-1281

Araştırma Makalesi/Research Article

Yol tüneli yangınında duvar kaplamasının ısı etkisinin sayısal incelenmesi

Numerical investigation of the thermal effect of wall coating in road tunnel fire

Onur Yemenici, Barbaros Küçük

1282-1288

Research Article/Araştırma Makalesi

Surface coating of stainless steels by HVOF method and investigation of wear properties

HVOF yöntemi ile paslanmaz çeliklerin yüzeylerin kaplanması ve aşınma özelliklerinin incelenmesi

Yıldız Yaralı Özbek, Batuhan Özer

1289-1295

Araştırma Makalesi/Research Article

Nohut proteininin ultrases destekli özütlenmesinin optimizasyonu ve tekno-fonksiyonel özellikleri

Optimization of ultrasound-assisted extraction of chickpea protein and techno-functional properties

Merve Akalan, Mehmet Şükrü Karakuş, Bülent Başyigit, Asliye Karaaslan, Mehmet Karaaslan

1296-1304

Derleme Makalesi /Review Article

Elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesinde kullanılan güç aktarım yöntemlerinin incelenmesi

Analysis of power transfer methods used in wireless charging of electric vehicles

Ahmet Hamdi Reyhan, Ahmet Doğan

1305-1317

Araştırma Makalesi/Research Article

Şistlerin dayanım anizotropisinde sıcaklık ve pH'nin etkisi

The effect of temperature and pH on the strength anisotropy of schists

Mehmet Özdemir, Sunay Beyhan, Kaan Erarşlan

1318-1324

Araştırma Makalesi/Research Article

Düz bir levhaya çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dairesel hava jetlerinde ısı transferi etkilerinin incelenmesi

Investigation of effects of heat transfer in unconfined and confined impinging circular air jets on flat plate

Haluk Keleş, Yücel Özmen

1325-1334

Research Article/Araştırma Makalesi

Utilization of toxic marine invaders in the development of low-loss microwave devices

Düşük kayıplı mikrodalgı cihazlarının geliştirilmesinde zehirli deniz istilacılarının kullanımı

Erkan Uğurlu, Önder Duysak, Fatih Özkan Alkurt, Muharrem Karaaslan, Arlet Patricia Franco

1335-1340

Araştırma Makalesi/Research Article

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı gerçek-zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) tekniğinin performansının değerlendirilmesi ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı

Evaluation of the performance of the real-time precise point positioning (RT-PPP) technique based on low-cost GNSS observations and contribution of multi-GNSS observations

Mert Bezciöglü

1341-1350

Araştırma Makalesi/Research Article

Güneş enerjisinin İç Anadolu bölgesinde kullanılabilirliği ve sistem analizi

Usability and system analysis of solar energy in the Central Anatolia region

Müjdat Öztürk, Ramazan Kayabaşı

1351-1359

Derleme Makalesi /Review Article

Geleneksel ve bitkisel tabanlı kesme sıvılarının insan/çevre sağlığı ve işlenebilirlik bakımından değerlendirilmesi

Evaluation of traditional and vegetable based cutting fluids in terms of human/environmental health and machinability

Erman Aydın

1360-1371

Araştırma Makalesi/Research Article

Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi

Use of photogrammetry in the development of digital twins and visualization with augmented reality

Abdurahman Yasin Yiğit, Murat Uysal

1372-1384

Araştırma Makalesi/Research Article

Rehabilitasyon uygulamalarına yönelik el ve parmak hareketlerini taklit eden robot el tasarımı

Design of a robotic hand imitating hand and finger gestures for rehabilitation applications

Yağmur Çiğdem Kalan, Eda Akman Aydın

1385-1391

Araştırma Makalesi/Research Article

Üniversite toplu kullanım alanlarında iç ortam hava kalitesinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi

Indoor air quality in university public use areas evaluation in terms of occupational health and safety

Yeşim Yılmaz, Ayşegül Bayın Sarıahmetoğlu

1392-1402

Research Article/Araştırma Makalesi

Application of atomized hydrosols to rainbow trout fillets as an easy preservative

Gökkuşluğu alabalığı filetolarına kolay bir koruyucu olarak atomize hidrosollerin uygulanması

Emre Yavuzer, Mehmet Yetişen, Dilek Yaprak Uslu

1403-1408

Araştırma Makalesi/Research Article

Balya Pb/Zn flotasyon atığının BCR sıralı ekstraksiyon tekniği ile metal türleşmesinin belirlenmesi

Determination of metal fractionation of Balya Pb/Zn tailings by BCR sequential extraction technique

Emin Ender Çelebi

1409-1416

Araştırma Makalesi/Research Article

Küresel iklim model verilerinin farklı yöntemlerle ayrıştırılması ve geleceğe yönelik yağış tahminlerinin yapılması

Disaggregation of global climate model data using different methods and predicting future precipitation

Burak Gül

1417-1425

Research Article/Araştırma Makalesi

Simulating hydropower reservoir operations of the Yamula Dam with machine learning

Yamula Barajının hidroelektrik rezervuar işletiminin makine öğrenimi ile simülasyonu

Mustafa Şahin Doğan

1426-1435

Araştırma Makalesi/Research Article

Sadeleştirilmiş kısıt-tampon-bağ (S-DBR) ve yalın-hat dengesi yöntemlerinin simülasyonla kıyaslanması

Benchmarking of S-DBR and lean-line balancing methods by simulation

Batuhan Kocaoğlu, Utkan Uluçay

1436-1451

Research Article/Araştırma Makalesi

Mathematical correlations for variation in heat release rate of a diesel engine fuelled with n-octanol blends

n-Oktan ol karışımlarıyla çalışan bir dizel motorun ısı yayılımı oranının değişimi için matematiksel korelasyonlar

Mert Gülüm

1452-1480

Research Article/Araştırma Makalesi

Optimal sizing of grid-connected hybrid energy systems for electric vehicle charging stations considering charging demand periods and economic parameters

Elektrikli araç şarj istasyonları için şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin şarj talep dönemleri ve ekonomik parametreler göz önünde bulundurularak optimum boyutlandırılması

Alpaslan Demirci

1481-1491

Research Article/Araştırma Makalesi

The investigation of cutting parameters for improving cutting performance in band saw machines

Şerit testere tezgâhlarında kesme performansını iyileştirmek için kesme parametrelerinin incelenmesi

Seda Yıldız, Gökhan Atalı, Emrah Beker, Ulaş Birgül

1492-1498

Research Article/Araştırma Makalesi

The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads

Dinamik yüklerin etkisi altında abrasiv aşınma gösteren beko-loder kova turnaklarının çalışma ömürlerinin belirlenmesi

Menderes Kalkat, Mehmet Bahadır, Furkan Yılmaz

1499-1507

Araştırma Makalesi/Research Article

MOORA yöntemleri ve TOPSIS arasındaki ilişkinin bir yatırım önceliği belirleme probleminde incelenmesi

Examination of the correlation between MOORA methods and TOPSIS in an investment priority problem

Sena Orhan, Selen Avcı Azkeskin, Zerrin Aladağ

1508-1516



Araştırma Makalesi/Research Article

M91/IM10 tek yönlü prepreg plakanın yüksek burkulma mukavemetine sahip olacak şekilde genetik algoritma yöntemi ile açılı dizilimi optimizasyonu
Stacking sequence optimization of M91/IM10 unidirectional prepreg plate with high buckling strength by genetic algorithm method

İzzet Kaya, Serhat Yılmaz

1517-1522

Araştırma Makalesi/Research Article

Karbon ayak izi tespiti: Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi örneği
Determination of carbon footprint: The case of Osmaniye Korkut Ata University

Ali Burak Yavuz, Osman Kara, Bülent Yanıktepe

1523-1530

Araştırma Makalesi/Research Article

Helisel sarılmış ısı eşanjörünün deneysel ve sayısal analizi
Experimental and numerical analysis of helical coiled heat exchanger

Mustafa Caner, Ertan Buyruk

1531-1537

Araştırma Makalesi/Research Article

YouTube trend büyük veri kümelerinden ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi
Cross-country persistent tags discovery from YouTube trending video big dataset

Yeşim Dokuz

1538-1544

Research Article/Araştırma Makalesi

A new bearing fault diagnosis approach based on common spatial pattern features
Ortak uzamsal örüntü özneliklerine dayalı yeni bir rulman arızası teşhisi yaklaşımı

Nurhan Gürsel Özmen, Yunus Emre Karabacak

1545-1557

Araştırma Makalesi/Research Article

Kızılılötesi kurutmada hurma (*Phoenix dactylifera L.*) pestilinin efektif difüzyon katsayısının belirlenmesi: Pişme süresinin etkisi
*Effective diffusivity determination of date (*Phoenix dactylifera L.*) leather in infrared drying: Effect of cooking time*

Suzan Tireki

1558-1565

Araştırma Makalesi/Research Article

Endüstriyel katı atık yönetiminde bilinç seviyesi: Niğde Bor karma ve deri ihtisas organize sanayi bölgesi örneği
Level of awareness in industrial solid waste management: Niğde Bor mixed and leather specialized organized industrial zone case

Kemal Ulusoy, Nilay Kavaklı, Fehiman Çiner

1566-1572

Research Article/Araştırma Makalesi

Effect of drilling parameters on hole quality in drilling of pultruded GFRP composite material: Surface roughness, thrust force and delamination factor
Pultrüzyon ile üretilen GFRP kompozit malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin delik kalitesine etkisi: Yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti ve delaminasyon faktörü

Kaan Emre Engin, Harun Yaka

1573-1580



Araştırma Makalesi/Research Article

Elektriksel ve kimyasal kuplajlı izhikevich nöron modelinin geri adımlamalı kontrol yöntemi ile senkronizasyonu

Synchronization of electrically and chemically coupled izhikevich neuron model via backstepping control method

Zühra Karaca, Nimet Korkmaz, Recai Kılıç

1581-1587

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye’de satışı sunulan çaylarda ve bitki çaylarında fitalat ester düzeylerinin belirlenmesi

Determination of phthalate ester levels in teas and herbal teas available in Türkiye

İsra Toptancı

1588-1592

Research Article/Araştırma Makalesi

Estimating cetane numbers of pure biodiesels through multiple non-linear correlations depending on some fuel properties

Bazı yakıt özelliklerine bağlı olarak çoklu non-linear korelasyonlar yoluyla saf biyodizellerin setan sayılarının tahmin edilmesi

Mert Gülüm

1593-1605

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı döküm yöntemleriyle üretilen Zn-%1Mg alaşımının mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerinin karşılaştırılması

Comparison of microstructure, mechanical and corrosion properties of Zn-%1Mg alloy produced by different casting methods

Selma Özarlan

1606-1614

Research Article/Araştırma Makalesi

Friction stir spot weld (FSSW) of AZ91 magnesium alloys; effect of axial force and rotational speed on weld quality and an approach on inspection planning

AZ91 magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı; eksenel kuvvet ve dönme hızının kaynak kalitesine etkisi ve muayene planlamasına ilişkin bir yaklaşım

Yasin Sarıkavak

1615-1620

Research Article/Araştırma Makalesi

Modeling of carbon dioxide electrolysis with reversible fuel cells

Tersinir yakıt hücreleri ile karbondioksit elektrolizinin modellenmesi

Hasan Özcan

1621-1629



Farklı nişasta kaynakları ile üretilen köfterlerin renk ve tekstür özelliklerinin araştırılması

Investigation of color and texture properties of köfter produced with different starch sources

Hamza Alaşalvar¹ , Hakan Erinç^{2,*} 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Buğday unu birçok gıda içerisinde kullanılan önemli bir besin maddesidir. Ancak bazı tüketiciler, buğday ununda bulunan gluten proteininin tüketimi ile tetiklenen çölyak hastalığına sahiptirler. Bu yüzden, bu çalışmada yöresel bir ürün olan köfterde buğday ununa alternatif olarak buğday, mısır ve patates nişastalarının kullanımının renk ve tekstürel özellikler üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Üretiminde patates nişastası kullanılan köfter örneği buğday unu ile benzer parlaklık değeri göstermiştir. Farklı kaynaklardan nişasta kullanımı ile kırmızılık değerinde azalmalar gözlenmiş olmasına rağmen patates nişastası kullanımı ile buğday ununa benzer değerler elde edilmiştir. Ayrıca en düşük sarılık değeri mısır nişastası kullanımı ile ölçülmüştür. Sertlik ve esneklik bakımından buğday unu ve patates nişastası kullanımı ile elde edilen sonuçlar benzerdir ancak patates nişastası kullanımı ile en yüksek yapışkanlık değeri ölçülmüştür. Korelasyon analizden elde edilen sonuçlara göre farklı nişasta kaynaklarının kullanımı ile birlikte köfter örneklerinin renk ve tekstürel özellikleri arasında negatif yönlü bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar farklı kaynaklardan elde edilen nişastaların köfter üretiminde kullanımının renk ve tekstürel özellikler üzerine önemli etkilerinin olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Köfter, Renk, Tekstür, Nişasta, Korelasyon

1 Giriş

Üzüm beslenmemizde önemli bir yeri olan ve ülkemizde yaygın olarak üretimi gerçekleştirilen ekonomik öneme sahip meyvelerden bir tanesidir. Üzüm, yaş ve kuru formda tüketiminin yanı sıra farklı ürünlere işlenerek de tüketicilere sunulmaktadır. Bu ürünler incelendiğinde, üzüm şırası, şarap, sirke, pekmez, pestil ve köfter gibi geniş bir ürün yelpazesi olduğu görülmektedir [1].

Bu ürünlerden köfter, Niğde, Nevşehir ve Kayseri gibi illeri kapsayan Kapadokya bölgesine özgü geleneksel bir üründür. Pestil ve köfterin üretim aşamaları birbiri ile benzerlik göstermektedir. Her iki ürünün üretiminde genel olarak üzüm suyu konsantresinin eldesi (üzüm pekmezi), buğday unu veya buğday nişastasının eklenmesi, jel yapının

Abstract

Wheat flour is an important food ingredient widely used in many food products. However, some consumers have celiac disease, which is triggered by the consumption of gluten protein found in wheat flour. Therefore, this study aimed to investigate the effects of using wheat, corn, and potato starch as alternatives to wheat flour on the color and textural properties of köfter, a traditional local product. The köfter sample produced with potato starch showed a similar lightness value to wheat flour. Although decreases in redness value were observed with the use of starch from different sources, potato starch yielded values similar to wheat flour. Additionally, the lowest yellowness value was measured with the use of corn starch. In terms of hardness and elasticity, the results obtained with wheat flour and potato starch were similar, but the highest stickiness value was measured with the use of potato starch. Correlation analysis revealed a negative relationship between the color and textural properties of köfter samples when different starch sources were used. The results obtained from this study determine the significant effects of using starch from different sources on the color and textural properties of köfter samples.

Keywords: Köfter, Color, Texture, Starch, Correlation

oluşturulması, yayma ve kurutma işlem basamakları uygulanmaktadır. Bu iki ürünün birbirinden ayıran temel farklılık ürünlerin kurutulmasından önce yayma işlemi sırasında uygulanan farklı kalınlıkları ile ilişkilidir. Pestil üretiminde mümkün olduğunca ince bir tabaka (1-2 mm) oluşacak şekilde yayma işlemi gerçekleştirilirken, köfter üretiminde ürünlerin kalınlığı yaklaşık 2 cm olarak ayarlanır [2,3].

Yukarıda belirtildiği gibi köfter üretiminde geleneksel olarak buğday unu kullanılmaktadır. Buğday unu kullanımı köftere karakteristik özelliği olan jelimsi yapıyı kazandırmaktadır. Ancak buğday unu içerisinde yer alan gluten proteini, bu proteine karşı hassasiyetleri olan bireylerin bu ürünleri tüketimini engellemektedir. Gluten

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: (herinc@ohu.edu.tr) H. Erinç

Geliş / Received: 08.05.2021 Kabul / Accepted: 04.07.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.934970

tüketimi ile ortaya çıkan bu hastalık çölyak hastalığı olarak isimlendirilmektedir. Çölyak hastalığı gluten tüketimi ile ortaya çıkan bir bağışıklık sistemi bozukluğudur [4]. Çölyak hastalığına sahip insanların sağlıklı bir yaşam sürmeleri için gluten içermeyen ürünleri tüketmeleri bir zorunluluktur [5]. Bu hastalığa sahip kişiler, birçok ülkede nüfusun yaklaşık %1' ini oluşturmaktadır. Ancak, gluten içeren ürünleri beslenme rutinlerinden çıkararak daha sağlıklı bir yaşam süreceklerine inanan insanların sayısı da gün geçtikçe artmaktadır [6]. Bu nedenle birçok üründe buğday unu yerine gluten içermeyen tahıl unlarının veya farklı kaynaklardan nişastaların kullanımı üzerine birçok çalışma yürütülmektedir.

Nişasta, başlıca amiloz ve amilopektinden oluşan bir polisakarittir. Elde edildiği kaynağa bağlı olarak nişasta, farklı jelatinizasyon sıcaklığı, viskozite ve jelleşme kapasitesi göstermektedir [7]. Bu farklılıkların oluşmasında amiloz/amilopektin oranı ve nişasta granüllerinin parçacık boyutu gibi nişastanın elde edildiği kaynağa özgü etmenler etkili olmaktadır [8]. Ayrıca bu farklılıklar, nişasta kullanılarak üretilen ürünlerin özelliklerini de etkileyebilmektedir.

Literatürde, köfterin fizikokimyasal, tekstür ve biyoaktif özelliklerini gösteren çalışmalar bulunmaktadır [1,9]. Ayrıca, Becerikli ve Başoğlu [9], köfter üretiminde buğday unlu kullanımı ile un-yumurta ve un-nişasta kullanımının köfterlerin özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Ancak buğday unu yerine farklı nişasta kaynakları kullanımının köfterin özellikleri üzerine etkileri araştırılmamıştır. Bu nedenle, sunulan bu çalışmada köfter örneklerinde buğday unu yerine buğday, mısır ve patates nişastası kullanımının renk ve tekstürel özellikleri üzerine etkilerini belirlemek amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyaller

Üzüm pekmezi, farklı kaynaklardan nişastalar (buğday, mısır, patates) ve buğday unu Niğde' de bulunan yerel bir marketten temin edilmiştir.

2.2 Köfter üretimi

Köfter yapımı için 100 g üzüm pekmezi, 50 mL saf su ve 15 g nişasta (mısır, buğday ve patates) veya buğday unu kullanılmıştır (Tablo 1). Metal bir kap içerisine pekmez konulduktan sonra kaynaya kadar ısıtılmaya bırakılmıştır. Diğer taraftan ayrı bir kaptan 15 g nişasta (kontrol örneklerinde buğday unu) 150 mL saf suya ilave edilerek

bulamaç hazırlanmış ve pekmeze ilave edilmiştir. Ardından bu karışım 10 dakika boyunca karıştırılmış ve kaynatılmıştır. Koyulaşan örnek üzerine, şekil verilmek için nişasta serpilmiş ve kalınlık yaklaşık 2 cm olacak şekilde tepsilere yayılmıştır. Yayma işleminden sonra oda sıcaklığında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.3 Renk değerinin belirlenmesi

Köfter örneklerinin renk değerleri, üç boyutlu renk ölçüm esasına dayanan Minolta renk tayin cihazı (CR-300, Japonya) kullanılarak Hunter sistemine göre L* (parlıklık), a* (kırmızılık) ve b* (sarıklık) değerleri ölçülmüştür. Renk ölçüm cihazının kalibrasyonunda standart beyaz plaka (L*: 96,97, a*: 0,16, b*: 1,86) kullanılmıştır.

2.4 Tekstürel özelliklerin belirlenmesi

Köfter örneklerinin tekstürel özelliklerinin belirlenmesinde TA-XT2i Tektür Analiz cihazı (Stable Mikro Systems Ltd, Godalming Surrey, İngiltere) kullanılmıştır. Örneklerin (yaklaşık 5 g) sertlik, esneklik, iç yapışkanlık, sakızimsılık, çignenebilirlik ve elastikiyet özellikleri P/35 probu (test hızı 5 mm/sn ve mesafe 10 mm) ile belirlenirken; yapışkanlık (stickness) özellikleri SMS P/25 P probu (test hızı 0,50 mm/sn ve uygulanan kuvvet 40 g) yardımıyla en az 5 örnek kullanılarak belirlenmiştir.

2.5 İstatistiksel analizler

Farklı nişasta kaynaklarının ve buğday unu kullanımı ile köfterin renk ve tekstürel özelliklerinde meydana gelen değişimlerin incelenmesinde tek yönlü varyans analizi kullanılmış ve ortalamalar arasındaki farklılıklar %95 güven aralığında Duncan çoklu karşılaştırma testi kullanılarak belirlenmiştir. Korelasyon analizi örneklerin renk ve tekstürel özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel değerlendirme çalışmaları XLSTAT 2016 sürümü (Addinsoft, New York, Amerika) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

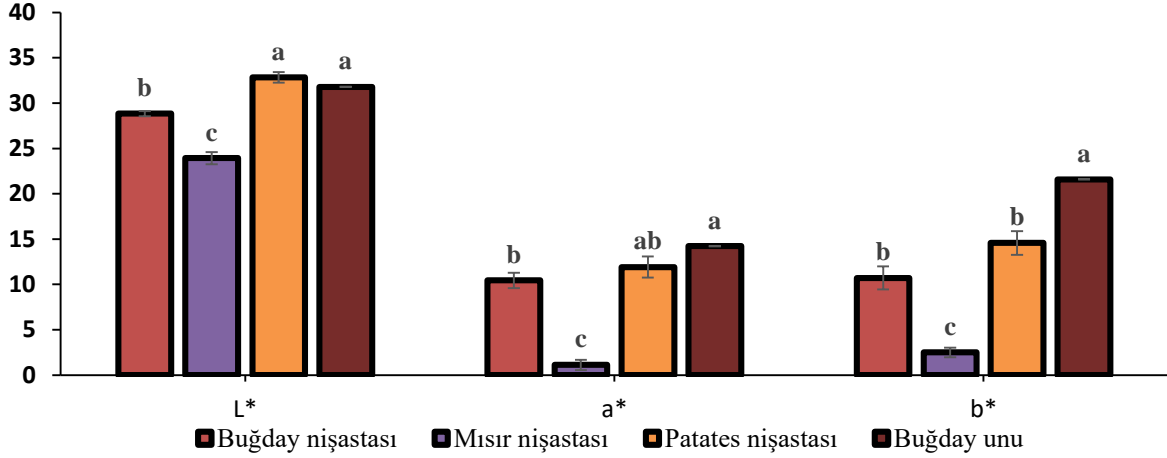
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Köfter örneklerinin renk özellikleri

Gıda ürünlerinin renk özellikleri tüketici tercihini belirleyen önemli ölçütlerden bir tanesidir. Renk analiz sonuçlarına göre köfter üretiminde farklı nişastaların kullanımı renk özelliklerini istatistiksel olarak önemli ($p < 0.05$) düzeyde etkilemiştir (Şekil 1). Örneklerin parlaklığını ifade eden L* değerleri incelendiğinde, üretimde patates nişastası kullanıldığında en yüksek parlaklık değeri (32.84)

Tablo 1. Köfter formülasyonları

Bileşenler	Köfter Örnekleri			
	Buğday unu	Buğday Nişastası	Mısır Nişastası	Patates Nişastası
Buğday unu (g)	15	-	-	-
Buğday nişastası (g)	-	15	-	-
Mısır nişastası (g)	-	-	15	-
Patates nişastası (g)	-	-	-	15
Su (mL)	50	50	50	50
Üzüm pekmezi (g)	100	100	100	100



Şekil 1. Köfter örneklerinin renk değerleri

elde edilirken, en düşük parlaklık değeri (23.93) mısır nişastası kullanıldığında gözlenmiştir. Kontrol örneğinde (buğday unu) ise L* değeri 31.79 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki buğday unu yerine patates nişastası kullanımı benzer parlaklık özellikleri sergilemektedir ($p > 0.05$). Örneklerin yeşillik-kırmızılık özelliğini gösteren a* değerine göre en yüksek kırmızılık buğday ununda gözlenmiş (14.22) ve buğday ununu patates nişastası (11.92), buğday nişastası (10.45) ve mısır nişastası (1.12) içeren örnekler takip etmiştir.

Renk özelliklerinden b* değeri, örneklerin mavilik-sarıklık özelliklerini ifade etmektedir. Kırmızılıkta olduğu gibi en yüksek değer (21.59) buğday ununun kullanıldığında gözlenmiş ve mısır nişastası kullanımı ile en düşük sarılık değeri (2.5) ölçülmüştür. Renk analizinden elde edilen sonuçlara göre buğday ununa benzer renk özelliklerine sahip köfterlerin üretimi için alternatif olarak patates nişastasının kullanımı uygun olabilir. Farklı nişasta kaynakları kullanılarak üretilen surimi jel yapılarının renklerinde farklılıkların meydana gelebileceği rapor edilmiş ve gözlenen bu farklılıklar, nişastaların farklı renk özelliklerine sahip olmasıyla açıklanmıştır [10].

Gerçekaslan ve Aktaş [1] tarafından ticari olarak üretilen köfterlerin L*, a* ve b* değerleri depolama süresine bağlı olarak sırasıyla 25.89-26.61, 1.56-1.86 ve 6.42-7.18 olarak rapor edilmiştir. Becerikli ve Başoğlu [9] tarafından yürütülen bir çalışmada ise üretimde buğday unu, un-yumurta ve un-nişasta kullanımına bağlı olarak L (32.54-

35.54), a (2.54-3.67) ve b (10.85-13.68) değerleri ölçülmüştür. Bizim çalışmamızda elde edilen L* (parlaklık) ve b* (sarılık) değerleri genellikle daha önceki çalışmalar ile paralellik göstermektedir. Ancak, mısır nişastası kullanılan örnekler hariç diğer örneklerde ölçülen a* (kırmızılık) değerleri daha önceki çalışmalardan yüksektir. Gözlenen bu farklılık mısır nişastasının özelliklerine ilaveten köfterlerin üretiminde kullanılan farklı işlem sıcaklıkları ve süreleri ile ilişkili olabilir.

3.2 Köfter örneklerinin tekstürel özellikleri

Farklı kaynaklardan nişastalar kullanılarak üretilen köfter örneklerinin tekstürel özelliklerinde meydana gelen değişimler sertlik, esneklik, yapışkanlık, iç yapışkanlık, sakızimsılık, çiğnenebilirlik ve elastikiyet parametrelerinin ölçümüyle belirlenmiştir (Tablo 2). Köfter örneklerinin tekstürel özellikleri farklı nişasta kaynaklarının kullanımı ile istatistiksel olarak önemli derecede ($p < 0.05$) etkilenmiştir. Köfterlerde en yüksek sertlik değerleri (3668 g) buğday nişastası kullanıldığında gözlenmiştir. Mısır nişastası kullanımı buğday unundan yüksek sertlik (1924 g) sergilerken, patates nişastası kullanımı ile buğday ununa benzer bir sertlik (1100 g) ölçülmüştür. Esneklik değerleri incelendiğinde buğday nişastası ve mısır nişastası kullanılarak üretilen köfterlerin benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir (sırasıyla 0.80 ve 0.78 mm). Kontrol örneği ile karşılaştırıldığında patates nişastası kullanımı köfterlerin esnekliğini azaltmıştır (sırasıyla 0.60 ve 0.48 mm).

Tablo 2. Köfter örneklerinin tekstürel özellikleri

Örnekler	Sertlik (g)	Esneklik (mm)	Yapışkanlık (g)	İç yapışkanlık	Sakızimsılık (g)	Çiğnenebilirlik (g)	Elastikiyet (g)
Buğday Nişastası	3668±185 ^a	0.80±0.03 ^a	75.03±0.62 ^c	0.69±0.03 ^a	2413±152 ^a	2019±87 ^a	0.16±0.01 ^a
Mısır Nişastası	1924±39 ^b	0.78±0.02 ^a	11.22±0.84 ^d	0.72±0.01 ^a	1384±40 ^b	1086±53 ^b	0.13±0.01 ^a
Patates Nişastası	1100±72 ^c	0.48±0.06 ^b	136.10±1.27 ^a	0.24±0.01 ^c	216±11 ^d	125±20 ^d	0.06±0.01 ^c
Buğday unu	1333±60 ^c	0.60±0.03 ^b	96.97±6.33 ^b	0.55±0.01 ^b	730±38 ^c	444±41 ^c	0.09±0.00 ^b
P değeri > F	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002

^{a,b,c,d} Farklı harflerle gösterilen ortalamalar istatistiksel açıdan farklıdır ($p < 0.05$)

Tablo 3. Köfterlerin renk ve tekstürel değerleri arasındaki ilişki

Değişkenler	Sertlik	Esneklik	Yapışkanlık	İç yapışkanlık	Sakızimsılık	Çiğnenebilirlik	Elastikiyet	L*	a*	b*
Sertlik	1	0.802	-0.356	0.648	0.972	0.981	0.893	-0.375	-0.155	-0.366
Esneklik	0.802	1	-0.838	0.952	0.916	0.903	0.984	-0.819	-0.604	-0.649
Yapışkanlık	-0.356	-0.838	1	-0.868	-0.551	-0.531	-0.728	0.979	0.873	0.775
İç yapışkanlık	0.648	0.952	-0.868	1	0.807	0.774	0.912	-0.792	-0.543	-0.496
Sakızimsılık	0.972	0.916	-0.551	0.807	1	0.998	0.972	-0.546	-0.305	-0.456
Çiğnenebilirlik	0.981	0.903	-0.531	0.774	0.998	1	0.963	-0.540	-0.314	-0.481
Elastikiyet	0.893	0.984	-0.728	0.912	0.972	0.963	1	-0.711	-0.475	-0.565
L*	-0.375	-0.819	0.979	-0.792	-0.546	-0.540	-0.711	1	0.943	0.887
a*	-0.155	-0.604	0.873	-0.543	-0.305	-0.314	-0.475	0.943	1	0.947
b*	-0.366	-0.649	0.775	-0.496	-0.456	-0.481	-0.565	0.887	0.947	1

Buğday ve mısır nişastalarının kullanımı ile köfterlerin sakızimsılık değerleri artarken, patates nişastası kullanımı ile sakızimsılık değeri azalmıştır (sırasıyla, 2413, 1384 ve 216 g). Ürünlerin çiğnenebilirlik ve elastikiyet değerleri içinde sakızimsılık ile benzer bir eğilim gözlenmiştir. Örneklerin yapışkanlık özelliği tekstür profil özelliklerinden bağımsız olarak belirlenmiş ve patates nişastası kullanımı ile köfterlerin daha yapışkan bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir. Yapışkanlık özelliklerine göre patates nişastasını, buğday unu, buğday nişastası ve mısır nişastası takip etmiştir (sırasıyla 136.10, 96.97, 75.03 ve 11.22 g).

Kontrol örneği (buğday unu) ile kıyaslandığında en yüksek sertlik, sakızimsılık, çiğnenebilirlik ve elastikiyet değerleri buğday nişastası kullanılarak üretilen köfter örneklerinde gözlenmiştir. Buğday unun büyük bir kısmını nişasta (%70-75) oluşturmasına rağmen önemli miktarda protein (%8-14), lipit (yaklaşık %2) ve nişasta dışındaki polisakaritler de buğday unu içerisinde yer almaktadır. Buğday ununda yer alan nişasta haricindeki bileşenlerin varlığı nişastanın jelatinizasyon davranışı etkileyebilmektedir [11]. Nişasta haricinde unda bulunan bu bileşenler jelatinizasyon için gerekli olan suyu hapsederek veya nişasta ile kompleks oluşturarak buğday ununun buğday nişastasından farklı özellikler göstermesine sebep olabilmektedir [11, 12]. Diğer taraftan farklı kaynaklardan elde edilen nişastaların parçacık boyutları, morfolojileri ve amiloz/amilopektin oranları bu nişastaların ilave edildikleri ürünlerin özelliklerinde farklılıkların oluşmasına sebep olmaktadır [13].

Literatürde köfter örneklerinde farklı kaynaklardan nişasta kullanımını inceleyen herhangi bir çalışma yoktur. Ancak, köftere benzer bir ürün olarak Gümüşhane pestilin kalite, biyoaktif ve duyu özellikleri üzerine buğday, mısır ve patates unlarının karışımlarının etkileri incelenmiş ve mısır unu kullanımının buğday unu ile benzer özellikler gösterdiği rapor edilmiştir [3].

3.3 Korelasyon analizi

Köfter üretiminde buğday unu ve farklı kaynaklardan nişastaların kullanımı ile örneklerinin renk ve tekstürel özelliklerinde değişimlerin meydana geldiği belirlenmiştir. Korelasyon analizi, farklı nişasta ve buğday unu kullanımı

ile köfterlerin renk ve tekstürel özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılmıştır. Tablo 3'den de görülebileceği gibi örneklerin yapışkanlık hariç bütün tekstürel özellikleri birbirleriyle pozitif yönde güçlü bir ilişki göstermiştir. Bu durum farklı nişasta kullanıldığında sertlik, iç yapışkanlık, esneklik, sakızimsılık, çiğnenebilirlik ve elastikiyet değerlerinin birlikte arttığını ya da azaldığı göstermektedir. Benzer şekilde renk özelliklerinin de (L*, a* ve b*) birbirleriyle pozitif yönde ilişkili olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, köfter örneklerinin tekstürel özelliklerindeki artışlar ile birlikte renk özelliklerinde azalışların meydana geldiği gözlenmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, köfter üretiminde buğday ununa alternatif olarak buğday, mısır ve patates nişastalarının kullanımının renk ve tekstürel özelliklere etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre renk özellikleri açısından patates nişastası kullanımı buğday ununa yakın parlaklık ve kırmızılık sağlarken, tekstürel özellikler (sertlik ve esneklik) açısından ise mısır nişastasının buğday ununa yakın özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları açıkça göstermektedir ki kullanılan nişasta tipine bağlı olarak köfterlerin renk ve tekstürel özellikleri birbirinden farklılaşmaktadır. Geleneksel olarak buğday unu kullanımının köfter üretiminde kabul görmesi göz önüne alınarak glutensiz köfter üretimi ile ilgili yürütülecek çalışmalarda nişasta tiplerinin farklı oranlarının renk ve tekstürel özelliklerde meydana getireceği değişimlerin incelenmesi gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] K. E. Gerçekaslan and N. Aktaş, Textural properties of Köftür, a fruit based dessert. Food and Science. Technology, 40, 718–721, 2020. <https://doi.org/10.1590/fst.10819>.
- [2] N. Aktaş and K. E. Gerçekaslan, Glass transition and sorption properties of köftür: A dehydrated fruit-based

- product. *Food and Science Technology*, 40, 503–511, 2020. [https://doi: 10.1590/fst.34419](https://doi.org/10.1590/fst.34419).
- [3] B. Yavuz, Farklı unlar kullanılarak hazırlanan pestillerin fizikokimyasal, biyoaktif, reolojik ve duyuşsal özellikleri ile optimizasyonun belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye, 2019.
- [4] S. Norouzbeigi, L. Vahid-Dastjerdi, R. Yekta, S. Sohrabvandi, F. Zendeboodi, and A. M. Mortazavian, “Celiac therapy by administration of probiotics in food products: a review,” *Current Opinion in Food Science*, 32, 58–66, 2020. [https://doi: 10.1016/j.cofs.2020.01.005](https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.005).
- [5] S. Rossi, F. Capobianco, G. Sabatino, F. Maurano, D. Luongo, and M. Rossi, Pilot scale production of a non-immunogenic soluble gluten by wheat flour transamidation with applications in food processing for celiac-susceptible people. *Journal of Cereal Science*, 96, 103117, 2020. [https://doi: 10.1016/j.jcs.2020.103117](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103117).
- [6] N. R. Reilly, The Gluten-Free Diet: Recognizing Fact, Fiction, and Fad. *Journal of Pediatrics*, 175, 206–210, 2016. [https://doi: 10.1016/j.jpeds.2016.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2016.04.014).
- [7] C. A. Gómez-Aldapa, G. Velazquez, M. C. Gutierrez, J. Castro-Rosas, E. J. Jiménez-Regalado, and R. Y. Aguirre-Loredo, Characterization of Functional Properties of Biodegradable Films Based on Starches from Different Botanical Sources. *Starch/Staerke*, 72, 11–12, 1900282, 2020. [https://doi: 10.1002/star.201900282](https://doi.org/10.1002/star.201900282).
- [8] M. Wei, R. Andersson, G. Xie, S. Salehi, D. Boström, and S. Xiong, Properties of Cassava Stem Starch Being a New Starch Resource. *Starch/Staerke*, 70, 5–6, 1700125, 2018. [https://doi: 10.1002/star.201700125](https://doi.org/10.1002/star.201700125).
- [9] F. Becerikli ve F. Başoğlu, Geleneksel ürünlerimizden olan köftürün bazı biyoaktif, fizikokimyasal ve kimyasal özellikleri, *GIDA.*, 43, 2, 356–363, 2018. [https://doi: 10.15237/gida.GD17085](https://doi.org/10.15237/gida.GD17085).
- [10] H. Liu, Y. Nie, and H. Chen, Effect of different starches on colors and textural properties of surimi-starch gels, *International Journal of Food Properties*, 17, 7, 1439–1448, 2014. [https://doi: 10.1080/10942912.2012.680224](https://doi.org/10.1080/10942912.2012.680224).
- [11] P. Guo, J. Yu, L. Copeland, S. Wang, and S. Wang, Mechanisms of starch gelatinization during heating of wheat flour and its effect on in vitro starch digestibility. *Food Hydrocolloids*, 82, 370–378, 2018. [https://doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.04.012](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.012).
- [12] M. Jekle, K. Mühlberger, and T. Becker, Starch-gluten interactions during gelatinization and its functionality in dough like model systems. *Food Hydrocolloids.*, 54, 196–201, 2016. [https://doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.10.005](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.10.005).
- [13] M. Schirmer, M. Jekle, and T. Becker, Starch gelatinization and its complexity for analysis. *Starch/Staerke*, 67, 1–2, 30–41, 2015. [https://doi: 10.1002/star.201400071](https://doi.org/10.1002/star.201400071).





Parametric study of nonlinear finite element punching behavior of fiber-reinforced concrete slab

Fiber takviyeli beton döşemenin doğrusal olmayan zımbalama davranışı üzerine parametrik bir çalışma

Mohammed S. Al Jawahery¹ , Mehmet Tolga Göğüş^{2,*} , Rayan Faiz Hadi Boto³ 

¹ Architecture Engineering Department, College of Engineering, University of Mosul, 41001 Mosul, Iraq

² Gaziantep University, Civil Engineering Department, 27310, Gaziantep, Türkiye

³ Gaziantep University, Graduate School of Natural & Applied Sciences, 27310, Gaziantep, Türkiye

Abstract

This paper investigates the effect of fiber on the behavior of punching shear slabs; a finite element modeling approach is used to simulate the case study. The proportion mix of hybrid fiber-reinforced concrete, which contains 0.2 percent macro synthetic fibers and 0.68, 0.8, and 0.96 percent steel fibers, compressive strengths of 50 MPa, different longitudinal reinforcement used, and slab thicknesses of 150, 200, and 250 mm are all joined and investigated in this study. The ATENA software is used to perform nonlinear finite element analysis. The slab results validation was done similarly to previous experimental work, and the acquired results indicated a significant agreement. Thirty-six two-way specimen slabs with dimensions of 1900 × 1900mm were modeled in this investigation. All four sides of the slabs are supported. The results showed that the slabs' ultimate shear capacity increases with increasing the hybrid steel fiber. Nevertheless, the ultimate capacity of the slabs has decreased due to an increase in the reinforcement ratio and slab thickness.

Keywords: Slabs, HFRC slabs, Finite element method, Nonlinear analysis

1 Introduction

Slabs are the prominent structural members in any multi-story structure; it directly carries the live load [1]. When a slab has been supported directly on columns without beams, a flat slab knows it [2]; therefore, the punching shear stresses generated near the columns primarily control the flat plate depth [3]. To keep the thickness of the slab as low as possible and to prevent the column from disastrously failing and brittle failure by "punching" through the slab, the designer's responsibility should be to decrease shear stress at the slab column edge or to increase shear resistance at the slab column edge [4, 5].

Fiber Reinforced Concrete (FRC) is a concrete mix containing various fibrous materials to improve structural strength and durability [6]. Fibers are widely used in concrete to prevent cracking caused by both plastic and drying shrinkage. Polypropylene, glass, and steel fibers are

Öz

Bu makale, döşemelerin zımbalama kesmesi davranışı üzerinde lifin etkisini araştırmaktadır; vaka çalışmasını simüle etmek için bir sonlu eleman modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Yüzde 0.2 makro sentetik lifler ve yüzde 0.68, 0.8 ve 0.96 çelik lifler, 50 MPa basınç dayanımları, kullanılan farklı boyuna donatılar ve 150, 200 ve 250 mm levha kalınlıkları içeren hibrid lif takviyeli betonun oranı karışımı hepsi bu çalışmada birleştirilmiş ve incelenmiştir. ATENA yazılım doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yapmak için kullanılmıştır. Döşeme sonuçlarının doğrulanması, önceki deneysel çalışmalara benzer şekilde yapıldı ve elde edilen sonuçlar, büyük bir yakınlığın bulunduğunu gösterdi. Bu araştırmada, 1900 × 1900 mm boyutlarında otuz altı adet çift yönlü döşeme numunesi modellenmiştir. Döşemelerin dört tarafı da basit mesnetlidir. Sonuçlar, hibrit çelik elyaf ile döşemelerin nihai kesme kapasitesinin arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, takviye oranındaki ve plaka kalınlığındaki artış nedeniyle plakaların nihai kapasitesi azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Döşemeler, HFRC döşemeler, Sonlu Elemanlar Metodu, Doğrusal olmayan analiz.

some of concrete's most commonly used fibers. A hybrid fiber reinforced concrete is a concrete composite containing two or more fibers [7, 8]. Combining metallic and non-metallic fibers has been shown to improve the properties of concrete substantially. The ruling to combine two fibers can be based on their individual properties or simply on cost. Mixing steel with polypropylene fibers resulted in a significant rise in load-deflection response [9, 10]. Steel fibers for concrete reinforcement are defined as tiny, discrete lengths of steel with a volume fraction of 20 to 100, several cross-sections, and small enough to be distributed uniformly in an unhardened concrete mixture using standard mixing techniques [11]. Synthetic fibers are kid fibers that are the products of petrochemical and textile industry research and development [12]. On the other hand, synthetic fibres are useful in the early stages of a composite's existence, where the matrix is weak, brittle, and has a low modulus. Improved

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mtgogus@gantep.edu.tr (M. T. Göğüş)

Geliş / Recieved: 17.08.2021 Kabul / Accepted: 22.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.983719

material hardness in mature concrete is based on fiber volume value and fiber strength in the matrix [13].

Punching shear is a case of brittle failure after a concentrated force is supplied to a slab [14]. Many factors influence the punching shear strength of flat slabs. The compressive strength of concrete f_c' is one of the most significant. The effect occurs directly or indirectly while concrete tensile strength f_{ct} is used. The second parameter is the geometrical ratio of the longitudinal reinforcement; a third important parameter is d (instead of h , which is the overall slab height): a more significant depth improves the punching shear and the flexural strength of the slab [5, 15]. Punching defects in concrete are caused by low tensile strength, stiffness, flexural strength, shear strength, and brittleness [16]. However, punching failure is one of the most common failure mechanisms for this kind of structural system, it happened suddenly, with catastrophic results. In addition, without any warning [17].

(AlHamaydeh and Anwar Orabi, 2021) examined the behavior of synthetic fiber-reinforced to improve the shear capacity of flat slabs that were reinforced by employing glass fiber-reinforced polymer bars. Their findings can be found in the article. Six large-scale slabs are a part of the experimental program. According to the findings of the investigation, the punching shear resistances were only slightly improved when the synthetic fiber was utilized instead of the control slabs, and the result was an increase in toughness that was 2.34 times greater on average [18].

This study examines the influence of hybrid fiber on the behavior of punching shear flat slabs; a finite element modeling approach is used to simulate the case study. several parameters entered and examined in this study; the proportion mix of hybrid fibre-reinforced concrete, compressive strength, the ratio of the longitudinal reinforcement, and thickness of slabs.

2 Finite element modeling of hybrid fiber-reinforced concrete slab

2.1 General

Finite element analysis is a numerical method used by engineers to solve various challenges. One of the method's basic assumptions is that the domain may be partitioned into smaller parts where the equations may be approximated and solved. The region can also be partitioned into a finite number of elements linked together via nodes. The behavior of all structures may be represented by assembling the solution for each region [19].

To ensure the accuracy of the model used in the punching shear simulations in reinforced concrete, simulations had run and the results were compared to experimental data. Eight test specimens were simulated in this study, and the experimental findings should be compared to the data from the finite element calculations [17, 20].

Based on the experimental study [17], two of the experiment's test specimens were simulated using ATENA. The first simulation involved four-test prism specimens, one as a reference and the other three with varying numbers of fibers, so the dimensions of the prism were 100×100

×400mm according to the ASTM 1609/C1609M-05 standard to simulate the flexural strength of the HFRC.

The other simulated specimens were eight full-scale two-way slabs with dimensions of 1900×1900mm and 200 and 250mm thicknesses with various volume fibers. The slabs were loaded centrally using a 250×250mm column stub. The slabs were simply supported along all four sides. It is classified into two groups with 150, 200 and 250mm thicknesses. Each group had a varied percentage of fiber volume fractions of 0, 0.68, 0.8, and 0.96%. The fiber volume fraction was set at 0% in the reference slabs. The specimens were made with hooked-type steel fibers, and the synthetic fibers used in this study had a 90 aspect ratio. The manufacturer's specifications for the fibers used are presented in Table 1 [17].

2.2 Finite element modeling

For finite element analysis of punching shear in slabs, the software packages ATENA and GiD 3D were utilized [20]. The data preparation and mesh creation of models were done with GiD, while the FE analysis was done with ATENA. Cervenka Consulting has developed ATENA, a nonlinear finite element-based program for the study of RC-Structures The Fracture-plastic model was used in this study to combine constitutive models for tensile (fracturing) and compressive (plastic) behavior. The fracture model is based on the orthotropic smeared crack formulation and the crack band concept. The bilinear law, elastic-perfectly plastic model is used in this study as a constitutive model of steel reinforcement, The concrete was modeled using 3D solid hexahedron (brick) components with 8 nodes (CCIsoBrick<xxxxxxx>) with CC3DnonLin Cementitious2User material that is suitable for rock or concrete like materials. The steel reinforcing bars were modeled using 3D truss elements with 3 nodes (CCIsoTruss<xxx>) with CCReinforcement material, it can be used to define the material parameters for bars or tendons based on the reinforcement steel strength class, more information can be found out in the manual of Atena [21-24].

To allow for a reduction in the required computer capacity, it was comfortable and acceptable to simulate only a quarter of the test specimens due to symmetry [20]. In the symmetries, boundary conditions were used to prevent free movement in the direction of geometrical continuity. The FE model's geometry is constructed, also material properties were assigned to the various elements of the HFRC slab specimen; support, loading conditions, monitoring points, reinforcement details, and mesh in the HFRC slab are all described in Figure 1.

2.3 Parametric study of HFRC slabs

The parameters examined in this paper are the slab thickness, the strength of concrete, and the reinforcement ratio for the HFRC slab with a variant proportion of fibers. The dimensions of the slabs are 1900×1900mm with thicknesses of 150, 200, and 250mm. This study also covered the compressive strength utilized, 50MPa, to investigate the punching behavior of the HFRC slab. In addition, three types of steel bars were utilized in this study to explore the effect of the reinforcement ratio. The steel bar diameter in the

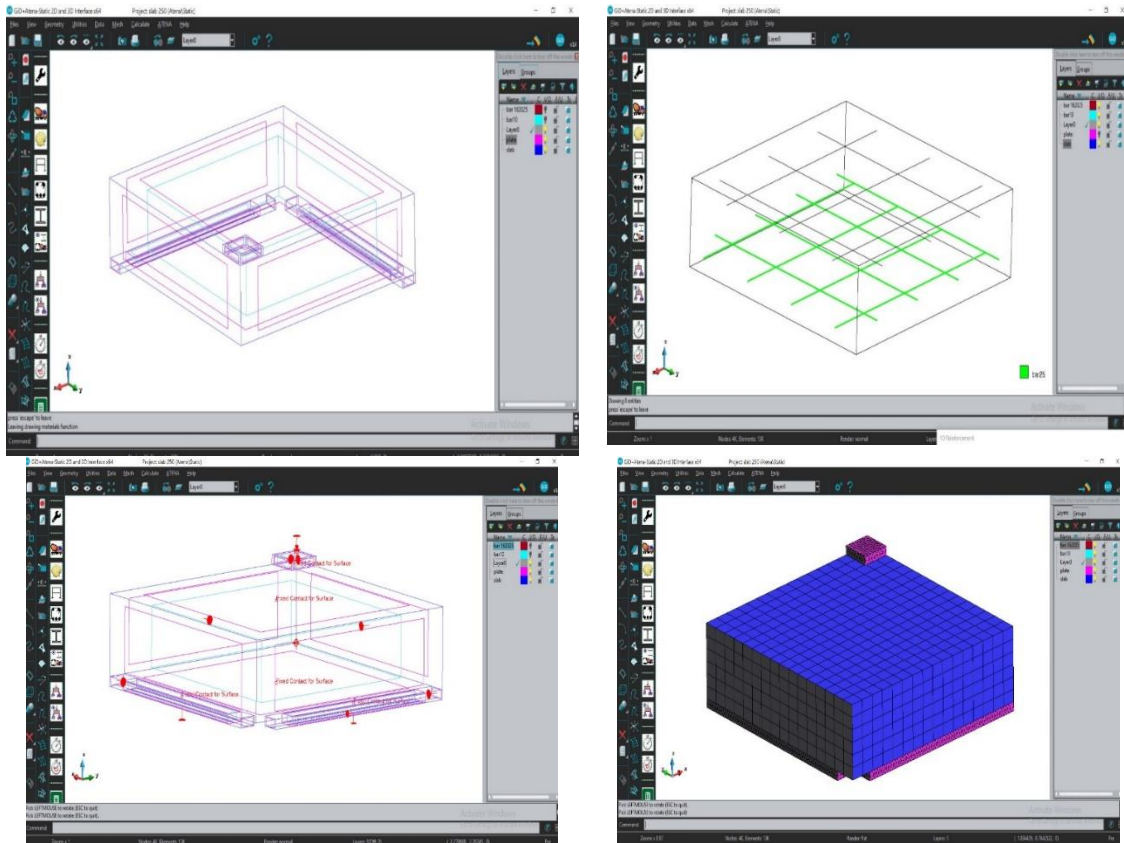


Figure 1. Display FE model's geometry with support, loading conditions, monitoring points, reinforcement details, and mesh in the HFRC slab

Table 1. Displays the prism results of ultimate load and deflection for experimental and FE models.

Steel fibers	Fiber type	-	Hooked
	Fiber length	L_f (mm)	50
	Fiber diameter	D_f (mm)	1.1
	Ultimate tensile strength	MPa	1100
Macro synthetic fibers	Fiber length	L_f (mm)	40
	Fiber diameter	D_f (mm)	0.45
	Ultimate tensile strength	MPa	620

bottom layer was 16 mm, 20 mm, and 25 mm, with reinforcement ratios (A_s/A_c) of 0.54, 0.84, and 1.31% for 150mm thickness, 0.4, 0.63, and 0.98% for 200mm thickness, and 0.32, 0.5, and 0.79% for 250mm thickness, respectively. The top layer of the steel bar was similar in all specimens about 10 mm.

3 Results and discussions

3.1 Validation results of HFRC flexural strength

The experimental and FE model results for four prisms, one as a reference and the others with varying fiber volume, are shown in Table 2. Furthermore, the load-deflection curves of prisms for experimental and FE model results for ultimate load capacity (P) and deflection at ultimate loads (Δ) of HFRC flexural strength are shown in Figures 2 and 3.

The FE model's results were close to the experimental study's results, as shown in Table 2, Figure 2, and Figure 3.

Therefore, the flexural strength results can be utilized to simulate HFRC slab specimens in the following steps.

3.2 Validation results of HFRC slabs

In this investigation, eight test specimens were simulated, with four specimens of 200 mm thickness and four specimens of 250 mm thickness, the experimental results were compared to simulations of finite element data. For each slab thickness, two specimens were chosen as a reference, while the remaining six specimens had varying volume fibers. Table 3, and 4 displays the specimen findings for ultimate load and deflection for experimental and FE models for HFRC slabs of 200 mm and 250 mm thickness.

As a result, Figures 4 and 5 show the load-deflection curves of the HFRC slab with a thickness of 200mm for the Exp. and FE models. Furthermore, Figures 6 and 7 show the load-deflection curves of the HFRC slab with a thickness of 250 mm for the Exp. and FE models.

Table 2. Displays the prism results of ultimate load and deflection for experimental and FE models.

No.	Prism type	Experimental		Finite Element	
		$P_{exp.}$ (KN)	$\Delta_{exp.}$ (mm)	P_{ATENA} (KN)	Δ_{ATENA} (mm)
1	Reference	14.3	0.66	14.25	0.01
2	HFR-0.68/0.2	18.64	0.7	18.75	0.65
3	HFR-0.80/0.2	18.89	0.67	18.93	0.93
4	HFR-0.96/0.2	21.91	1.34	22.31	1.22

Table 3. Displays the slab results of ultimate load and deflection for experimental and FE models.

No.	Specimens name	Experimental		Finite Element	
		$P_{exp.}$ (KN)	$\Delta_{exp.}$ (mm)	P_{ATENA} (KN)	Δ_{ATENA} (mm)
1	Reference 200	847.9	19.91	863.15	10.65
2	HFR200-0.68/0.2	978.1	21.23	1008.69	11.2
3	HFR200-0.80/0.2	1029.9	16.97	1014.63	14.95
4	HFR200-0.96/0.2	1117.6	19.97	1100.32	16.43
5	Reference 250	1147.6	11.66	1143.01	6.17
6	HFR250-0.68/0.2	1375.5	15.19	1336.8	8.12
7	HFR250-0.80/0.2	1300.2	14.12	1350.38	8.3
8	HFR250-0.96/0.2	1386.5	15.97	1486.68	9.46

The ultimate load and deflection calculated for the experimental and numerical models had reviewed in Table 3, when comparing them, distinguish that the ultimate load values were close to the experimental value. Nevertheless, the deflection values were acceptable when compared to experimental data. It is possible to say that the numerically obtained results are accurate compared to the experimentally obtained results.

In addition, Table 4 shows the experimental cracking pattern and finite element-cracking pattern for each slab of 200 mm and 250 mm HFR. When compared to crack pattern failure in experimental and finite elements, the numerical failure appears to have been accurate for the experimental failure.

3.3 Parametric result of HFR slabs

Reinforcement ratio and slab thickness were the main variables in this paper. For determining the effects of the fiber volume percentage on each slab specimen. Therefore, 36 specimen models had classified into three groups based on slab thickness 150, 200, and 250 mm. Each HFR slab group has 12 models classified by reinforcement ratio (ρ), slab thickness (h), and fibers volume (V_f).

The ultimate load and deflection results are presented in Table 4. In addition, Table 5 displays the load-deflection curves with a Finite Element crack pattern for all groups. It is clear to see that each parameter has a distinct influence on the shear capacity of the material. In addition, the effective values that can offer a more desirable value of ultimate shear strength are $f_c' = 90\text{MPa}$, $h = 150\text{ mm}$, steel reinforcement ratio $= 0.54\%$, and steel fiber ratio $= 0.96\%$. These values are all comprised of steel. The combination of these findings lends some credence to the conceptual premise that an increase in compressive strength results in an increase in shear capacity; however, the mean improvement in high compressive strength is dependent on the variation of

compressive strength, and it is more active when it changes from 50 to 70 MPa than when it changes from 70 until it reaches 90 MPa. This indicates that if the designer is looking for a value of compressive strength that is both more active and economical, the choice will be 70 MPa rather than 90 MPa, the thickness will be 150 mm, 0.54% of steel reinforcement ratio as well as 0.96% of steel fiber ratio will give the best results of shear capacity, and the ratio of steel fiber to steel reinforcement will be 0.96%.

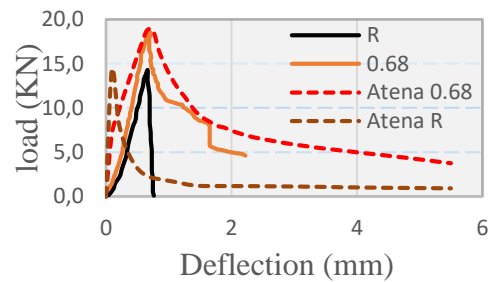


Figure 2. Displays the load-deflection curves of prisms for Experimental and FE models for reference and HFR-0.68/0.2

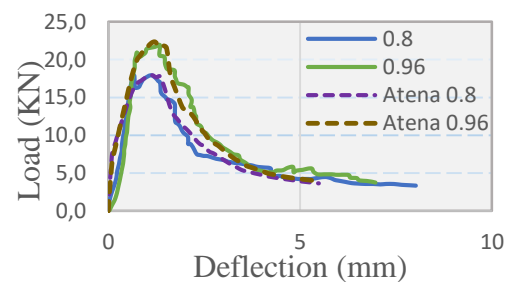


Figure 3. Displays the load-deflection curves of prisms for Experimental and FE models for HFR-0.8/0.2 and HFR-0.96/0.2

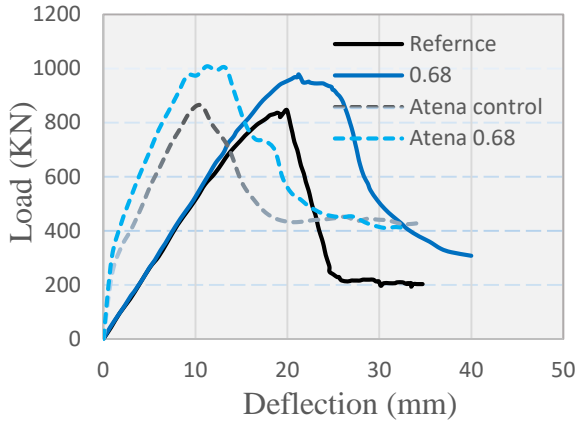


Figure 4. Displays the load-deflection curves of HFRC slab 200mm for Exp. and FE models for reference200 and HFR200-0.68/0.2

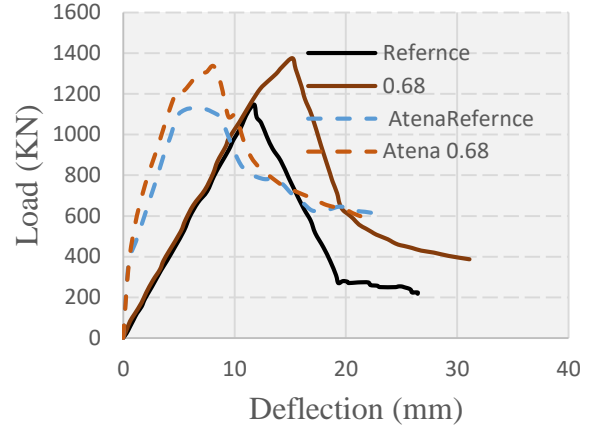


Figure 6. Displays the load-deflection curves of HFRC slab 250mm for Exp. and FE models for reference250 and HFR250-0.68/0.2

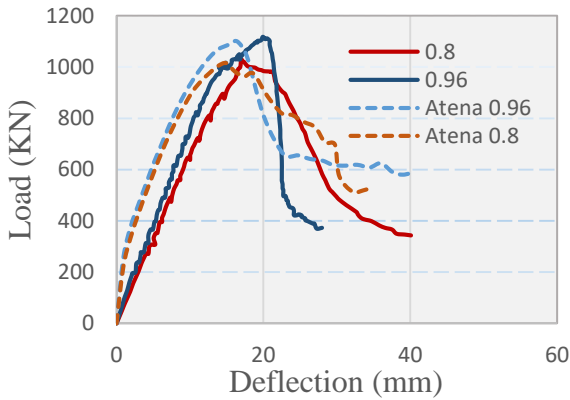


Figure 5. Displays the load-deflection curves of HFRC slab 200mm for Exp. and FE models for HFR200-0.8/0.2 and HFR200-0.96/0.2

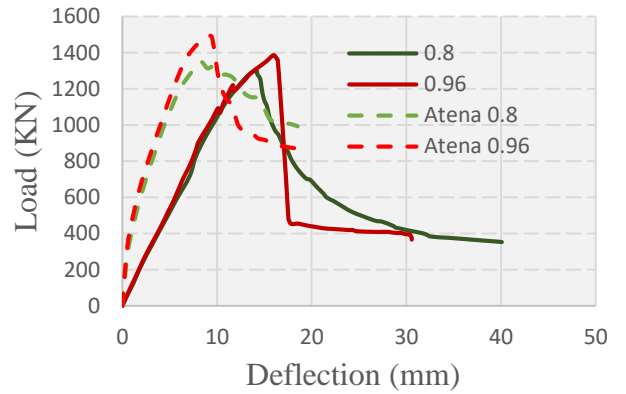


Figure 7. Displays the load-deflection curves of HFRC slab 250mm for Exp. and FE models and HFR250-0.8/0.2 and HFR250-0.96/0.2

Table 4. Displays the results of the ultimate load and deflection with a compressive strength of 50MPa

No.	Specimens name	f_c MPa	Slab thickness mm	$\Delta_{ult.}$ (mm)	$P_{ult.}$ (KN)
1	HFRC-R-0.54			22.80	400.846
2	HFRC-R-0.84			17.83	473.172
3	HFRC-R-1.31			14.87	513.450
4	HFRC-0.68/0.2-0.54			17.87	527.762
5	HFRC-0.68/0.2-0.84	50	150	15.88	547.025
6	HFRC-0.68/0.2-1.31			14.88	586.775
7	HFRC-0.8/0.2-0.54			29.44	547.467
8	HFRC-0.8/0.2-0.84			19.95	557.170
9	HFRC-0.8/0.2-1.31			17.44	590.280
10	HFRC-0.96/0.2-0.54			24.68	563.682
11	HFRC-0.96/0.2-0.84			21.90	606.995
12	HFRC-0.96/0.2-1.31			14.89	623.778
13	HFRC-R-0.4			17.703	670.319
14	HFRC-R-0.63			15.009	819.776
15	HFRC-R-0.98			10.158	842.235
16	HFRC-0.68/0.2-0.4			19.38	875.657
17	HFRC-0.68/0.2-0.63			12.49	903.167
18	HFRC-0.68/0.2-0.98	50	200	9.86	872.899
19	HFRC-0.8/0.2-0.4			16.90	800.999
20	HFRC-0.8/0.2-0.63			12.00	833.803
21	HFRC-0.8/0.2-0.98			11.87	873.434

Table 4. Displays the results of the ultimate load and deflection with a compressive strength of 50MPa (continued)

22	HFRC-0.96/0.2-0.4			19.52	862.374
23	HFRC-0.96/0.2-0.63			14.85	937.483
24	HFRC-0.96/0.2-0.98			11.90	963.232
25	HFRC-R-0.32			13.60	942.254
26	HFRC-R-0.5			11.86	1177.716
27	HFRC-R-0.79			7.94	1275.809
28	HFRC-0.68/0.2-0.32			10.11	1068.399
29	HFRC-0.68/0.2-0.5			7.96	1095.076
30	HFRC-0.68/0.2-0.79	50	250	7.83	1123.725
31	HFRC-0.8/0.2-0.32			11.11	1055.130
32	HFRC-0.8/0.2-0.5			11.52	1129.812
33	HFRC-0.8/0.2-0.79			10.26	1177.635
34	HFRC-0.96/0.2-0.32			15.75	1204.220
35	HFRC-0.96/0.2-0.5			10.57	1234.673
36	HFRC-0.96/0.2-0.79			6.70	1214.562

Table 5. Displays an experimental cracking pattern with a finite element cracking pattern for HFRC slab 200mm and 250mm


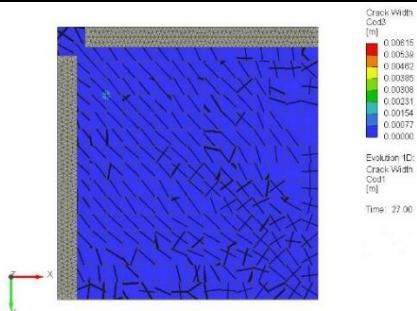

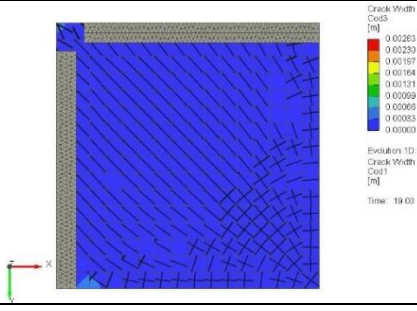

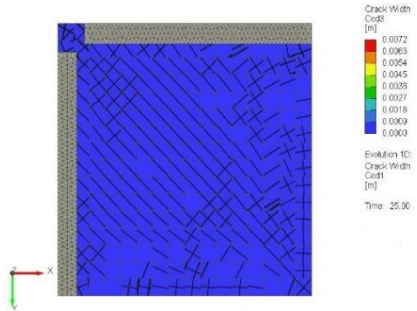
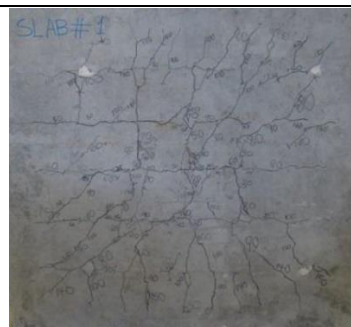
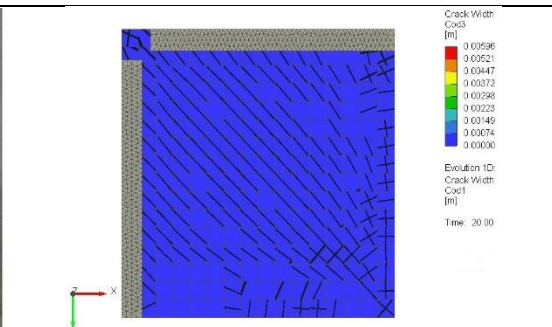
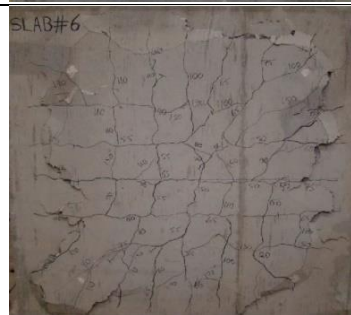
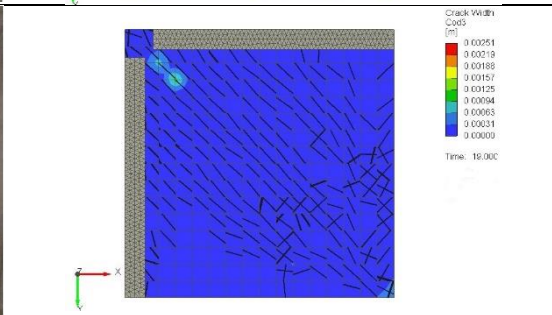

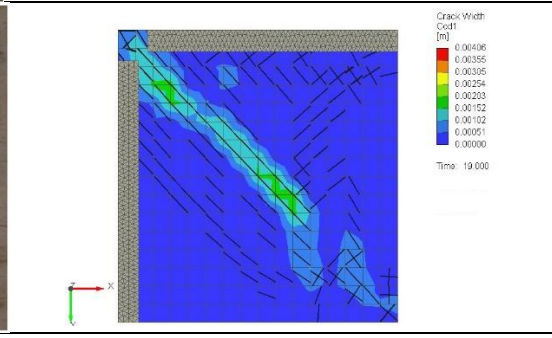

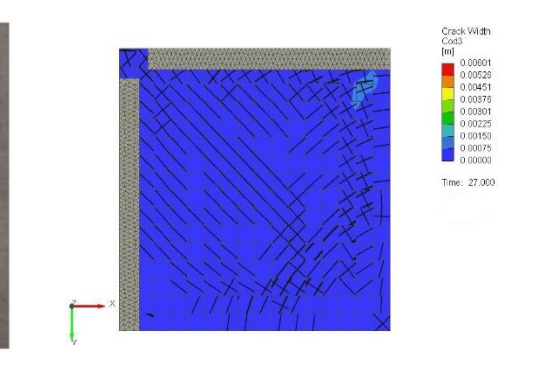
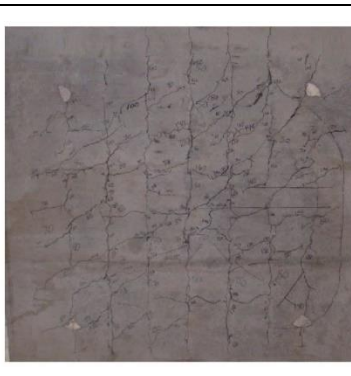
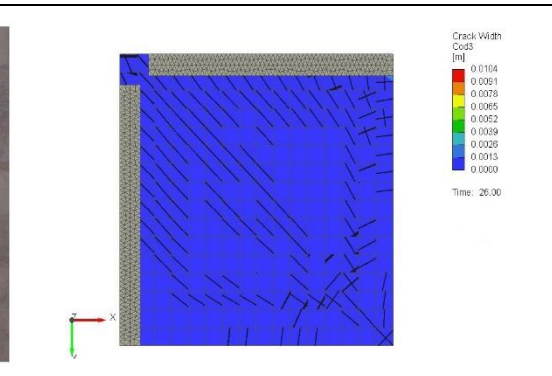
No.	Specimens name	Experimental cracks pattern	Finite Element cracks pattern
1	Reference 200		
2	HFR200-0.68/0.2		
3	HFR200-0.80/0.2		

Table 5. Displays an experimental cracking pattern with a finite element cracking pattern for HFRC slab 200mm and 250mm (continued)

<p>HFR200-0.96/0.2</p>		
<p>Reference 250</p>		
<p>HFR250-0.68/0.2</p>		
<p>HFR250-0.80/0.2</p>		
<p>HFR250-0.96/0.2</p>		

4 Conclusions

The work is focused on examining the effects of hybrid fiber volume fraction on slab depth, and reinforcement ratio, as the main factors, which affect the structural behavior of HFRC two-way slabs. The FE technique was used to understand the behavior of HFRC two-way slabs.

The following are the major conclusions of the parametric study:

The increase in slab thickness from 150 to 200 and 250mm with all reinforcement ratios leads to an increase in the ultimate load and a decrease in the deflection of the HFRC slabs

It has been declared from the results shown in Table 4 that the slab thickness works inversely with the punching shear capacity of the HFRC slab; while the thickness of the slab was increased, the ultimate shear capacity was reduced.

The increase in the reinforcement ratio leads to an increase in the ultimate load and a decrease in deflection for the HFRC slabs.

Also the reinforcement ratio works inversely with the punching shear capacity of the HFRC slab so that increasing the reinforcement ratio decreases the ultimate shear capacity in all slabs.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 14%

References

- [1] S.A. Al-Ta'an and A.A. Abdul-Razzak, Geometrical and material nonlinear finite analysis of fiber reinforced concrete slabs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/978/1/012041>
- [2] Mabrouk, R.T. and A.A. Hegab. Analysis of the punching behavior of RC flat slabs with horizontal and vertical shear reinforcement. MATEC Web Conf. 120 010062017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712001006>
- [3] J.A.O. Barros, B.N.M. Neto, G.S.S.A. Melo, C.M.V. Frazão, Assessment of the effectiveness of steel fibre reinforcement for the punching resistance of flat slabs by experimental research and design approach. Composites Part B: Engineering, 78, 8-25, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.050>
- [4] A.H. Aziz and S.S. Kareem, Development, Experimental study for punching shear behavior in RC flat plate with hybrid high strength concrete. Journal of Engineering and Sustainable Development, 17(3), 105-119, 2013.
- [5] R. Koppitz, A. Kenel and T. Keller, Punching shear of RC flat slabs—review of analytical models for new and strengthening of existing slabs, Engineering Structures, 52, 123-130, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.014>
- [6] M.S. Bharath and M.L. Pothula, Experimental study on punching shear strength of fiber reinforced hvfa concrete slabs. International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, 05(36), 7579-7586, 2016.
- [7] W.A. Labib, Evaluation of hybrid fibre-reinforced concrete slabs in terms of punching shear. Construction and Building Materials, 260, 119763, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119763>
- [8] T.H. Almusallam, A.A. Abadel, Y.A. A.N. A. Siddiqui and H. Abbas, Effectiveness of hybrid-fibers in improving the impact resistance of RC slabs. International Journal of Impact Engineering, 81, 61-73, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.03.010>
- [9] K. Kobayashi and R. Cho, Flexural characteristics of steel fibre and polyethylene fibre hybrid-reinforced concrete. Composites, 13(2), 164-168, 1982. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(82\)90054-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(82)90054-4)
- [10] F. Sermet and A. Ozdemir, Investigation of punching behaviour of steel and polypropylene fibre reinforced concrete slabs under normal load. Procedia Engineering, 161, 458-465, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.590>
- [11] S. P. Shah, J.I. Daniel, S. H. Ahmad, M. Arockiasamy, P. N. Balaguru, C. G. Ball and R.F. Zollo, Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, 90(1), 94-101, 1993.
- [12] P. Pujadas, A. Blanco, S.H.P. Cavalaro, A. Fuente and A. Aguado, Flat suspended slabs reinforced only with macro-synthetic fibres. In Proceedings of the 9th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete (BEFIB 2016), Vancouver, BC, Canada, 19–21 September 2016.
- [13] ACI 544.1R-96, report on fiber reinforced concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 1996.
- [14] S. Kinnunen and H. Nylander, Punching of concrete slabs without shear reinforcement. Elander Boktryckeri Aktiebolag, Sweden, 1960.
- [15] ZP Bazant and Z Cao, Size effect in punching shear failure of slabs. ACI Structural Journal, 84(1), 44-53, 1987.
- [16] A Caratelli, S Imperatore, A Meda, Z Rinaldi, Punching shear behavior of lightweight fiber reinforced concrete slabs. Composites Part B: Engineering, 99, 257-265, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.045>
- [17] R. Pourreza, Investigating the effects of hybrid fibres on the structural behaviour of two-way slabs. PhD Thesis. Memorial University of Newfoundland, 2014.
- [18] M. AlHamaydeh and M.A. Orabi, Punching shear behavior of synthetic fiber-reinforced self-consolidating concrete flat slabs with GFRP bars. Journal of Composites for Construction, 25(4), 04021029, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0001131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0001131)
- [19] E.K. Sayhood, S.P. Yaakoub and H.F. Hussien, Nonlinear finite element analysis for punching shear resistance of steel fibers high strength reinforced

- concrete slabs. *Jour. of Engineering and Technology*, 32(6), 1411-1432, 2014.
- [20] M. Navarro, S. Ivorra and F.B. Varona, Parametric finite element analysis of punching shear behaviour of RC slabs reinforced with bolts. *Computers & Structures*, 228, 106147, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106147>
- [21] V. Cervenka, J. Cervenka, Z. Janda, D. Pryl, ATENA Program Documentation, Part 8: User's Manual For Atena-Gid Interface; Cervenka Consulting, Prague, Czech Republic, 2017.
- [22] M.S. Al Jawahery, M.E. Gulsan, H.M. Albegmpri, I.A.H. Mansoori and A. Cevik Experimental investigation of rehabilitated RC haunched beams via CFRP with 3D-FE modeling analysis. *Engineering Structures*, 196, 109301, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109301>
- [23] V. Cervenka, L. Jedele and J. Cervenka, ATENA Program Documentation. Theory And User Manual, Cervenka Consulting, Czech Republic, Prague, 2018.
- [24] M.S. Al Jawahery, A. Cevik and M.E. Gulsan, 3D FE modeling and parametric analysis of steel fiber reinforced concrete haunched beams. *Advances in Concrete Construction*. 13(1), 45-69, 2022. <https://doi.org/10.12989/acc.2022.13.1.045>





Contribution of residential heating to air pollution in an industrial city of Turkey

Türkiye'nin bir sanayi şehrinde konut ısıtmasının hava kirliliğine katkısı

Zeynep İpek¹ , İbrahim Uyanık^{2*} 

¹ Erciyes University, Environmental Engineering Department, 38280, Kayseri, Türkiye

² Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Su Arıtma Dairesi Başkanlığı, 06050, Ankara, Türkiye

Abstract

In this study, the contribution of fuels (coal + natural gas) used for residential heating in Kayseri city center to air pollution was investigated. For this reason, the amount of emissions released to the atmosphere was calculated by using the natural gas and coal data used in the residences in the 5 (five) year period between 2015-2019 in the province of Kayseri. In addition, the percentage contribution of both residential heating and industrial point sources to air pollution in terms of emissions was compared. The relationship between annual average emission amounts and National Air Quality Monitoring Network data was also revealed. During the 5 years period, the total amount of emissions originating from the fuels used in residences and industries were 6171 tons for PM, 9049 tons for SO₂, and 14179 tons for NO_x. It has been evaluated that the decrease in PM₁₀ concentrations and the increase in NO_x concentrations from 2015 to 2019 may be related to the increase in natural gas use in the city. When evaluated in terms of emission amounts; it has been revealed that PM and SO₂ are mostly released from domestic sources, while NO_xs are from industrial sources.

Keywords: Natural gas, Coal, Emission, Residential, Industrial

1 Introduction

Air pollution caused by heating increases, especially with the onset of the winter period in Turkey. Air pollutants, which are the main causes of air pollution caused by heating; released into the atmosphere from the chimneys as a result of burning wood, coal, fuel oil, and natural gas in stoves and heaters. Some of these air pollutants have a toxic effect on the atmosphere when they exceed the limit values [1].

In the 2020 World Air Pollution Report, which covers 106 countries, Turkey ranks 46th in terms of air pollution. According to the report, the cities with the most air pollution in Turkey are; Çorum, Erzurum and Düzce. Kayseri ranks 7th in Turkey in terms of air pollution [2]. Kayseri city center has a hollow topographic structure; its east, south and southeast sides are surrounded by mountains. Due to its location and wind strength, air circulation in Kayseri is difficult to achieve, and therefore, air pollution problem

Öz

Bu çalışmada Kayseri il merkezinde konut ısınması amacıyla kullanılan yakıtların (kömür+doğalgaz) hava kirliliğine katkısı araştırılmıştır. Bu nedenle, Kayseri ilinde 2015-2019 yılları arasındaki 5 (beş) yıllık dönemde konutlarda kullanılan doğalgaz ve kömür verileri kullanılarak havaya salınan emisyon miktarları hesaplanmıştır. Ayrıca, hem konut ısınması hem de endüstriyel nokta kaynakların emisyon miktarları açısından hava kirliliğine yüzdesel katkısı karşılaştırılmıştır. Yıllık ortalama emisyon miktarları ile, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı verileri arasındaki ilişki ayrıca ortaya çıkarılmıştır. Çalışma süresi olan 2015-2019 yıllarını kapsayan 5 yıllık süre zarfında konut ve endüstrilerde kullanılan yakıtlardan kaynaklı oluşan toplam emisyon miktarları PM için 6171 ton, SO₂ için 9049 ton, NO_x için 14179 ton şeklindedir. 2015 yılından 2019 yılına doğru gerçekleşen PM₁₀ konsantrasyonlarında azalma ve NO_x konsantrasyonlarındaki artışın, kentte doğalgaz kullanımının artması ile ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Emisyon miktarları açısından değerlendirildiğinde; PM'in ve SO₂'nin evsel, NO_x'lerin ise çoğunlukla endüstriyel kaynaklardan salındığı ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Doğalgaz, Kömür, Emisyon, Konut, Endüstri,

arises in the city, especially in winter. Since this situation prevents the airflow in the city, the air quality of the city is adversely affected. There is an intense industrialization, rapid population growth and irregular urbanization in recent years [3]. Kayseri has three organized industrial zones (OIZ) with many industrial facilities, heavy traffic in peak hours and winter inversion that is worsens the air pollution in winter [3]. Air pollution is in the 4th priority when the environmental problems in 2015-2016 are ranked according to their importance and priorities in Kayseri [4].

Many researchers are studying on the effect of emissions resulting from the use of fuels for residential heating in the world. In the study by Khot and Chitre [5], higher levels of particulate matter were measured, especially in winter, due to seasonal conditions, as India is the third country with low quality fuel consumption, after China and the USA. In the study conducted by Kerimray et al. [6], when PM concentrations in households using coal in Ireland, Mongolia

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: iuyanik@erciyes.edu.tr (İ. Uyanık)

Geliş / Received: 04.10.2022 Kabul / Accepted: 15.06.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1183587

and China were compared; it was observed that there are significant differences in the pollution levels of the countries due to differences in ventilation, fuel quality, stove maintenance, and operation. In the study by Cichowicz [7], air pollution in Poland in terms of seasonality is high in winter and heating season, and low in summer. Higher air pollution levels during the winter months, together with emissions from household fuel consumption, is a common phenomenon due to inversion events during these periods. Yun et al. [8] stated that the housing sector in China contributed only 7.5% of the total energy consumption in 2014 but contributed 27% of PM_{2.5} emissions. They determined that the contribution of coal and biomass fuels used in residential heating was high in indoor and outdoor exposure.

One of the worst air pollution levels in Turkey was experienced in Ankara in the 1970s [9]. Özşahin et al. [10] revealed that the main cause of air pollution in Keşan district of Edirne province is poor quality fuels used for heating purposes. It has been determined that the annual average concentration of pollution consists of the most SO₂ and the least NO gases. Dadaşer-Çelik and Apaydın [1] conducted a study in 105 neighborhoods selected for Kayseri province in Kocasinan, Melikgazi and Talas districts, domestic coal has a share of 1.68% in total fuel consumption, while imported coal and natural gas are 47.9% and 50%, respectively. For Kayseri, annual total SO₂ emissions are calculated as 3023 tons, total NO_x emissions as 1251 tons, total CO emissions as 9193 tons, and total PM emissions as 844 tons. Morcalı and Akan [11] stated that the biggest reason for the high amount of SO₂ pollutant in Kahramanmaraş during the 3-month winter period, when compared to other periods, is the use of different types of solid fuels during the winter months. There are other studies conducted by Hamit et. al. [12] and Buldur and Sarı [13] stating increasing air pollution levels in winter months. Lastly, Dadaşer-Çelik and Azgın [14] showed that residential heating by coal, is the main air pollutant source in Kayseri. They found that the largest contributor to total emissions was residential heating, with lignite and anthracite burning as the main source of pollution for primary pollutants including PM, SO₂ and CO. In the literature, no study has been found in an industrial city where the use of domestic coal and natural gas is proportionally compared.

In this study, the amount of emissions resulting from the use of natural gas and coal used for residential heating in the province of Kayseri for the years 2015-2019 was calculated. In addition, the contribution of residential heating and industrial emission rates were compared. Graphical and statistical relationship between the emission values calculated and the air pollution parameters in the city center was revealed.

2 Materials and methods

2.1 Study area and data used

In this study, between 2015-2019; coal and natural gas data, that is used in residences and industries in the central districts of Kayseri, and data from the air quality monitoring

station were evaluated. Details about the data are given in Table 1.

Table 1. Air quality and residential fuel data used in the study

Data	Data gathered	Type of data	Data content
Air quality	havaizleme.gov.tr	Yearly average	-PM ₁₀ (µg/m ³)
			-SO ₂ (µg/m ³)
Fuel	KAYSERİGAZ	Yearly consumption	-Natural gas (Sm ³)
	KMM (Coal sales)	Yearly sales	-Coal (kg)
	KMM (social fund)	Yearly distribution	-Coal (kg)

KMM: Kayseri Metropolitan Municipality

Social fund: Fund for social cooperation and solidarity

Natural gas consumption data (between 2015-2019) was obtained from Kayseri Natural Gas Distribution Marketing and Trade Inc. (KAYSERİGAZ). Within the scope of natural gas data received from KAYSERİGAZ, the amount of natural gas used in residences for the years 2015-2019 was determined by the data obtained from the Kayseri Provincial Environmental Status Reports [15-16]. The amount of coal used in the residences in the central districts (Melikgazi, Kocasinan, Talas, Hacılar) in Kayseri Province between 2015-2019 was obtained from Kayseri Metropolitan Municipality.

The air pollution data of the city, measured at the Air Quality Monitoring Stations, were obtained from the website of the National Air Quality Monitoring Network [17]. Since 2007, air quality measurement stations have been operating in 3 regions that will represent the province, in order to measure pollutant emissions originating from fuels for heating and industrial purposes and traffic. These are the air quality measurement stations located in the Organized Industrial Zone, in the garden of the Private Melikgazi Hospital and in the Hürriyet neighborhood. PM₁₀ (particulate matter), SO₂ (sulfur dioxide), CO (carbon monoxide), NO_x (nitrogen oxides) parameters are measured in these stations [18]. Air quality measurement results can be viewed online at www.havaizleme.gov.tr and historical data can be accessed [17]. Natural gas and coal data and emission amounts in industries are taken from our previous study [19]. Quality Assurance vs. Quality Control (QA/QC) of this data is periodically checked and there is a detailed procedure about reporting [20].

2.2 Calculation of emission amounts

Based on the pollutants released to the air from coal and natural gas used in Kayseri city center between 2015-2019, PM, SO₂ and NO_x emission amounts resulting from the use of fuel in the residences were calculated. The emission factor expresses the mass of the pollutant released into the air per unit of fuel, which helps to estimate the amount of fuel consumed annually and the average amount of emissions according to the type of fuel. Emission amounts are calculated with the help of the following equation.

$$\text{Emission Amount} = \text{Fuel Amount} \times \text{EF (emission factor)} \quad (1)$$

Since there are no special emission factors created in Türkiye, emission factors published by the EEA, which is the common database of European countries, are used. The emission factors, used to calculate the amount of emissions from fuels, are taken from CORINAIR [21] and the source emission factors catalog of the US Environmental Protection Agency (USEPA) [21-22]. Emission factors, used to calculate pollutant emissions from residences in this study, are summarized in Table 2.

Table 2. Industrial and residential heating emission factors [21-22].

Fuel type	PM	SO ₂	NO _x
Lignite (kg/ton)	2	19.44*S	8.42
Petroleum coke (g/GJ)		500*S	300
Natural gas (kg/ton) <29 MW	0.174	0.014	4.34
Natural gas (kg/ton) >29 MW	0.174	0.014	2.28
Imported lignite (g/GJ)	404	675	110
Local lignite (g/GJ)	404	1200	110
Natural gas (residential) (kg/ton)	0.02	0.02	1.85

S:Percentage of S in fuel (%)

Two types of data were used for the amount of coal consumed by the residential heating of houses in Kayseri city center. These data are the amount of coal sold by the coal sales companies in the city and the distribution amounts of the social fund coals. Using these data, the amount of coal used for residential heating in the central districts has been reached. Ash, sulfur percentages and calorific values of the fuels needed to calculate the emission amounts are given in Table 3 and these values are taken from the fuel analysis results found in the 2015-2019 Environmental Status Reports prepared for Kayseri Province [15].

Table 3. Coal analysis results

Year	Fuel type	Lower calorific value (kcal/kg)	Lower calorific value (Gj/g)	Percentage of S (%)	Ash content (%)
2015	Imported	7336	30.71	0.32	6.98
	Local	4327	18.12	1.75	40.52
2016	Imported	6400	26.80	0.7	11
	Local	4678	19.59	1.65	28.76
2017	Imported	7690	32.20	0.45	5.3
	Local	4678	19.59	1.65	28.76
2018	Imported	7623	31.92	0.31	8.16
	Local	5030	21.06	1.56	17
2019	Imported	7262	30.40	0.45	7.86
	Local	4678	19.59	1.65	28.76

With this data, the annual emission amounts of fuels were calculated with Equation 1, using the emission factors given in Table 2. The amount of emissions caused by fuel use and the measurement results, obtained from air quality measurement stations, are shown on tables and graphics, and the relationship between fuel use and air pollution is revealed.

2.3 Statistical analysis

Emission amounts of domestic and industrial point sources were analyzed statistically with air pollution data between 2015-2019. For this, SPSS 10.0 program was used. Since some of the data are in the form of annual averages, annual average data were introduced to the program and variables with negative or positive high or low correlation were determined using the “Pearson Correlation” tool.

3 Results and discussion

3.1 Fuel consumption for residential heating

The amount of coal distributed to all Districts of Kayseri from the municipality for social fund for the years of 2015-2019 is given in Table 4. It has been determined that the amount of coal distribution, made in the central districts, constitutes 44 percent of the total distribution. Almost half of the total coal distribution in Kayseri is made to the central districts. Since 44% of coal distribution belongs to central districts by social fund, it has been accepted that 44% of total sales made in coal sales companies in Kayseri are made to central districts.

Table 4. Social fund coal amounts.

Municipality	Amount of coal (tons)				
	2015	2016	2017	2018	2019
City Center Municipalities	15135	16246	16458	15301	11992
Others	19707	22646	20704	20498	14293

The values accepted as the amount of coal sales made by the private companies to the central districts are given in Table 5. By taking the sum of the coal distributed by the social fund for the central districts and the coal sales by the coal sales companies, the total amount of coal used for residential heating in the central districts has been obtained. In addition, data on the amount of domestic natural gas consumption in Kayseri Province in the 2015-2019 periods are given in Table 5.

Table 5. Coal sales and total coal and natural gas amounts in the central districts of Kayseri Province

Parameter	2015	2016	2017	2018	2019
Coal Sales (Ton)	85350	81683	63305	52876	47623
Total Coal (Ton)	100485	97929	79763	68177	59615
Natural gas (Sm ³ , million)	303.9	361.9	375.8	362.7	396.4

3.2 Emissions from domestic heating and total emissions

Emission calculations were made with this assumption: 80% of the coal used in Kayseri is imported coal and 20% is domestic coal [15]. In Table 6, the total emission amounts of natural gas used in residences and coal sources used for domestic heating are given.

Between 2015 and 2019, the total PM emission amount due to coal use in residential heating was 4603 tons, SO₂ emission amount was 8521 tons, NO_x amount was 1253 tons. The total amount of natural gas emissions from residential

heating is 28 tons for PM, 28 tons for SO₂ and 2598 tons for NO_x. According to these data, it was seen that PM and SO₂ emissions were caused by coal, while NO_x emissions were mostly caused by natural gas.

Table 6. Emissions from fuels used for residential heating

Year	Natural gas (tonnes)			Coal (tonnes)		
	PM	SO ₂	NO _x	PM	SO ₂	NO _x
2015	4.7	4.7	438.6	1144	2103	311
2016	5.6	5.6	522.2	1003	1877	273
2017	5.8	5.9	542.3	956	1761	260
2018	5.6	5.7	523.4	819	1519	223
2019	6.2	6.2	572.0	680	1258	185

In Table 7, the emission amounts of the fuels used for energy production in residences and industries in the five-year period between 2015-2019 are given. According to this; a total of 4631 tons of PM, 8549 tons of SO₂ and 1256 tons of NO_x emissions were generated. The total amount of these emissions originating from solid fuels used for energy production in residences and industries was 6171 tons for PM, 9049 tons for SO₂, and 14179 tons for NO_x. It is also illustrated in Figure 1.

Table 7. Emission amounts due to fuel consumption for residential heating and energy generation in industries

Year	Residential heating			Industrial energy generation		
	PM (tonnes)	SO ₂ (tonnes)	NO _x (tonnes)	PM (tonnes)	SO ₂ (tonnes)	NO _x (tonnes)
2015	1,149	2,108	750	307	100	1,969
2016	1009	1,883	795	306	100	2,032
2017	962	1,768	803	317	101	2,132
2018	825	1,525	746	307	100	2,079
2019	686	1,265	757	303	99	2,116

While the contribution of fuel use in residences to PM and SO₂ emissions is high, the contribution of fuel use in industries is high for NO_x. In this case, it can be said that point sources caused by residential heating affect PM and SO₂ more than industrial fuel use for energy generation, while industrial point sources affect NO_x parameter more.

3.3 The relationship between fuel use and air pollution in residences

On the website of the National Air Quality Monitoring Network, annual average measurement results of PM₁₀, SO₂ and NO_x pollutants between 2015 and 2019 were obtained from three stations in Kayseri [17]. By taking the average of the annual measurement results of the three stations, the measurement results for that year were obtained for Kayseri.

The relationship between the annual amount of emissions caused by the use of i) coal and natural gas (total) in residences and total coal and natural gas use (residential and industrial) of Kayseri between the years 2015-2019 and the annual average measurement results obtained from air quality measurement stations are examined and presented in Figure 2 to 4 for these three pollutants.

When the PM₁₀ measurement results recorded in Kayseri and the amount of PM emissions resulting from the use of fuel in the residences are examined, it is seen that increases and decreases are in similar trend (Figure 2-a, b). While the annual average measurement result of the parameter was 80.5 µg/m³ in 2015, the average measurement result was 79.4 µg/m³ in 2016. The same decrease occurred in the amount of emissions as seen in the graph. Since 2017, it is seen that the measurement values have decreased in parallel with the decrease in the amount of coal use. It has been determined that the effect of the increase in the amount of natural gas usage on the PM parameter is realized at a very low rate compared to coal. With the decrease in the use of coal in the city and the increase in the use of natural gas, it has been determined that the PM₁₀ concentration has decreased in general every year during the period covering the 2015-2019 year. Similarly, in another study, it was determined that there was a decrease in PM₁₀ values between 2005 and 2015 in Turkey, and the effect of the transition from coal use to natural gas use in cities over the years was high [23]. When the graph related to the total emission amounts originating from coal and natural gas use in industry and residences is analyzed, it is seen that there are increases and decreases in a similar trend to the amount of residential emissions. This shows that the use of natural gas and coal for residential heating has a high contribution to the total amount of emissions.

When the emission amounts resulting from the use of fuel in residences and the annual average measurement results for the SO₂ parameter are evaluated, increases and decreases are in agreement with the years; 2016, 2017 and 2018 (Figure 3). Again, correspondence is expected between the emission amounts resulting from the amount of coal use in the industries and the measurement values, while there has been an increase in SO₂ measurement results, despite the decrease in coal use between the years 2015-2016. In 2019, while there was a decrease in the amount of emissions, the average measurement result of the parameter increased compared to the previous year. Since there will be no traffic-related interference in this situation, it can be mentioned that there is unknown source of fuel with high sulfur content. This increase in SO₂ concentration may be due to the illegal trade or displacement of social fund coals or quality change, like change in sulfur content. The total emission amount graph was also the same with the residential emission amount, as in PM.

For the NO_x parameter, there was both an increase and decrease in the concentration in similar trend with the emission amount (Figure 4-a). It was seen that the measured NO_x concentration increased with the increase in the amount of NO_x emission except for the year 2018 which has decreasing trend. Considering that NO_x emissions contribute to ozone formation, it is thought that this situation may provide a basis for measuring high ozone concentrations for Kayseri Province in the future. In Figure 4-b, it is seen that total emissions do not fluctuate. However, it is clearly seen that there is an uptrend both in NO_x emissions and yearly average concentrations.

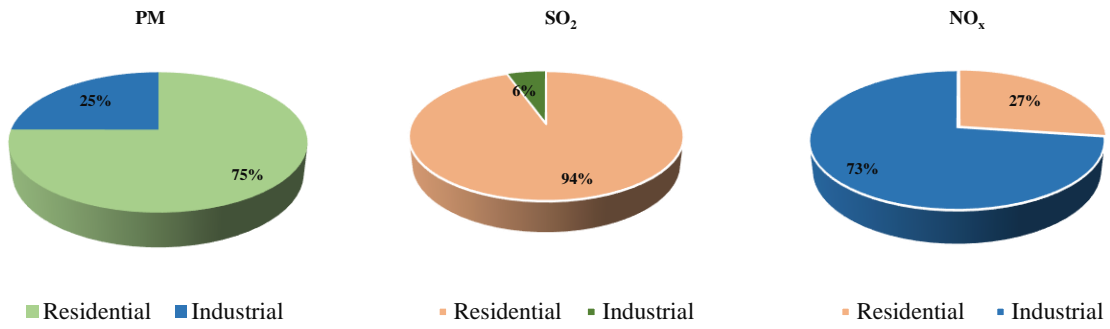


Figure 1. Rates of emissions resulting from fuel use for residential heating and industrial energy generation between 2015-2019

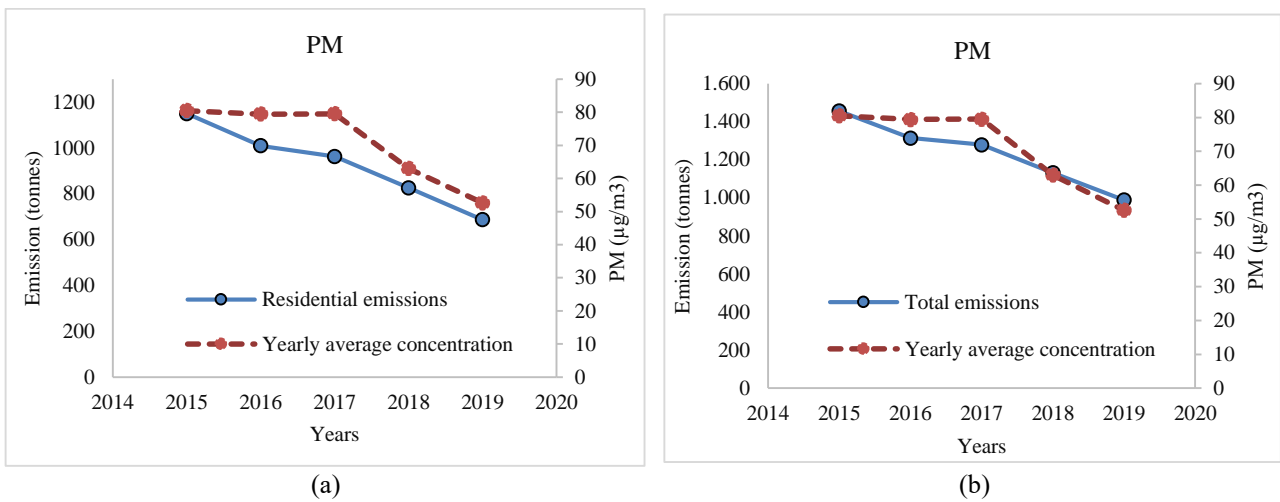


Figure 2. Comparison of PM emission amount and PM₁₀ average measurement results (a) Residential emissions (b) Total emissions

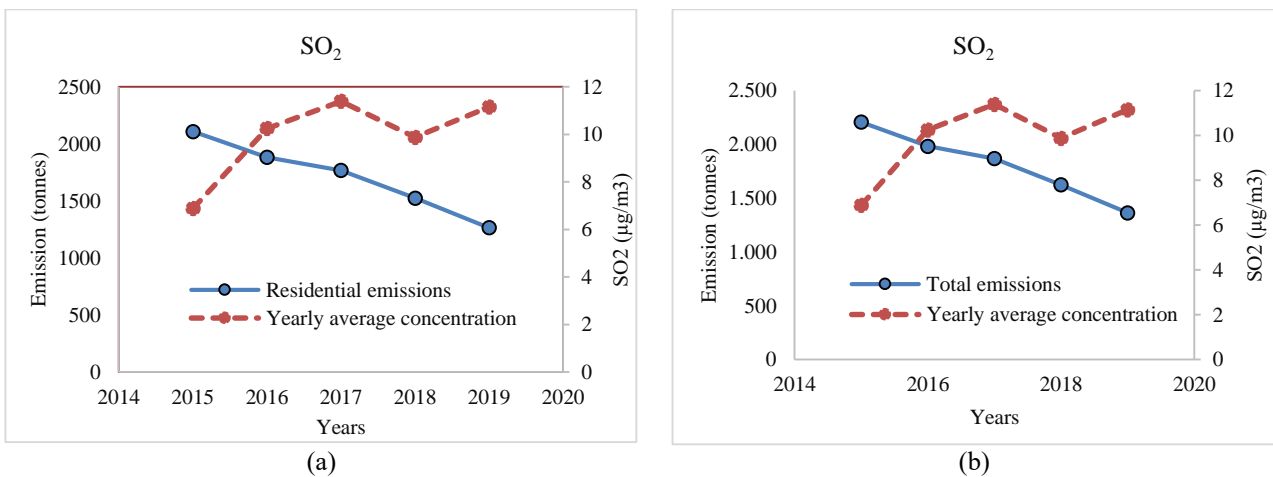


Figure 3. Comparison of SO₂ emission amount and SO₂ average measurement results (a) Residential emissions (b) Total emissions

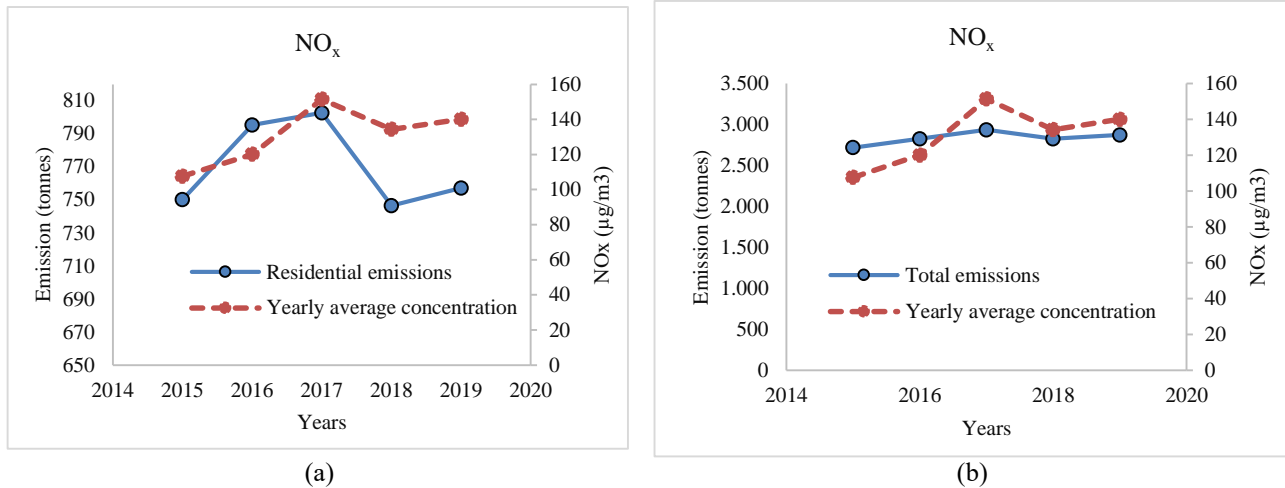


Figure 4. Comparison of NO_x emission amount and NO_x average measurement results (a) Residential emissions (b) Total emissions

Table 8. Statistical evaluation for concentrations and emissions

		C _{PM}	C _{SO₂}	C _{NO_x}	PM _{emission}	SO ₂ _{emission}	TNOX
	Pearson Correlation	1	-,394	-,386	,941*	,938*	-,236
C _{PM}	Sig. (2-tailed)		,512	,521	,017	,018	,702
	N	5	5	5	5	5	5
	Pearson Correlation	-,394	1	,877	-,680	-,683	,953*
C _{SO₂}	Sig. (2-tailed)	,512		,051	,207	,204	,012
	N	5	5	5	5	5	5
	Pearson Correlation	-,386	,877	1	-,627	-,656	,950*
C _{NO_x}	Sig. (2-tailed)	,521	,051		,257	,230	,013
	N	5	5	5	5	5	5
	Pearson Correlation	,941*	-,680	-,627	1	,998**	-,533
PM _{emission}	Sig. (2-tailed)	,017	,207	,257		,000	,355
	N	5	5	5	5	5	5
	Pearson Correlation	,938*	-,683	-,656	,998**	1	-,552
TSO ₂	Sig. (2-tailed)	,018	,204	,230	,000		,335
	N	5	5	5	5	5	5
	Pearson Correlation	-,236	,953*	,950*	-,533	-,552	1
TNOX	Sig. (2-tailed)	,702	,012	,013	,355	,335	
	N	5	5	5	5	5	5

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Air pollution has been an important problem for Kayseri Province due to its climatological and topographic structure [14]. It has been also concluded that the NO_x parameter is largely composed of emissions from industries. According to the studies conducted at the end of 2015 in Kayseri Province, it has been determined that the primary sources causing air pollution are emissions from heating with a rate of 40%. This is followed by emissions from traffic with a rate of 30%,

other factors with a rate of 20%, and topography and meteorological factors with a rate of 10% [4]. More studies are needed, like multivariate analysis, to investigate all factors affecting the air pollution [24]. In this study, air pollution trends follow the residential sourced emissions in PM and NO_x. Therefore, traffic induced air pollution may have low impact on air pollution trend. This may be due to

the ubiquitousness of the traffic effect on air quality monitoring stations.

Again, in a study conducted in Kayseri, it was stated that residential heating, in which a significant amount of coal is used in the city, is the main source of air pollutants [14]. In addition, studies conducted in the provinces of Kütahya, Erzurum, Batman and Isparta in our country have concluded that the effect of fuels used for heating housing on air pollution is high [12-13]. In a study conducted in Erzurum, it was emphasized that with the widespread use of natural gas for heating purposes in the city, the PM₁₀ concentration decreased compared to the period before the use of natural gas [25]. In a study conducted in China, it was reported that PM₁₀ concentration is mainly contributed from domestic heating [26].

3.4 Statistical evaluation

Statistical analysis of all emission amounts and air pollution concentrations was made and it was determined whether there was a significant correlation. The correlation of the total emission of each parameter revealed by the coals burned and the natural gas used for energy production in the industries and the average concentration of the pollutant parameters taken from the air pollution measurement stations in Kayseri province were investigated. According to the results in Table 8, there is a significant correlation between the amount of PM emission and the amount of SO₂ emission. Also, PM concentration is highly correlated to both PM and SO₂ emissions. For this reason, it can be said that coals burned for industrial energy production affect both SO₂ emissions and PM₁₀ emissions. Other emission sources should not be overlooked here. Therefore, it cannot be said that only coals burned in power plants affect SO₂ emissions. In addition, NO_x emissions were also found to be correlated to SO₂ and NO_x concentrations.

4 Conclusion

In this study, annual emission amounts of PM, SO₂ and NO_x parameters were calculated over the coal and natural gas consumption amounts used in the houses located in the areas covering the central districts of Kayseri Province between 2015-2019. Also, annual average air quality measurement parameters of PM₁₀, SO₂ and NO_x and the amount of emissions caused by fuel use are compared. It has been concluded that the effect of coal use in residences on pollutant emissions except for NO_x in Kayseri is higher than the use of natural gas. In addition, when the emission amounts due to fuel use and the emission measurement results are evaluated, it has been determined that the increase in the use of natural gas in the city and the decrease in the amount of coal use cause a decrease in the amount of PM₁₀, especially due to the change in the amount of emissions. It is thought that factors other than natural gas and coal use (use of other low quality fuels, etc.) have a significant effect on the reason for the increase and decrease in SO₂ amount. It has been concluded that the contribution of natural gas use to the increase in NO_x emission is high.

Acknowledgement

We have obtained the data to be used in this study; We would like to express our endless thanks to Kayseri Metropolitan Municipality and KAYSERİGAZ.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

Similarity Rate (Turnitin): 12%

References

- [1] D. Apaydın, F. Dadaşer Çelik, Inventory of Emissions from Area Sources in Kayseri. 2nd. International Conference on Environmental Science e Technology, Antalya, Türkiye, 14-17 Mayıs 2014, ss.1-10, 2014.
- [2] 2020 World Air Quality Report. <https://www.iqair.com/world-air-quality-report>, Erişim 12 Kasım 2021.
- [3] F. Dadaşer Çelik, H. Kırmacı, Kayseri İli Kent Merkezinde Kükürtdioksit ve Partiküler Madde Değerlerindeki Değişimlerin İncelenmesi: 1990-2007, Ekoloji Dergisi, 20(79), 2011.
- [4] T. Kartal, H. Akıllı, Ulusalda yerele Türkiye'de iklim değişikliği politikaları ve uygulamaları: Kayseri örneği. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Türkiye, 2018.
- [5] R. Khot, V. Chitre, Survey on air pollution monitoring systems. In 2017 international conference on innovations in information, embedded and communication systems (ICIIECS) (pp. 1-4). IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIIECS.2017.8275846>.
- [6] A. Kerimray, L. Rojas-Solórzano, M.A. Torkmahalleh, P.K. Hopke, B.P.O. Gallachóir, Coal use for residential heating: patterns, health implications and lessons learned. Energy for Sustainable Development, 40, 19-30, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.05.005>.
- [7] R. Cichowicz, G. Wielgosiński, W. Fetter, Dispersion of atmospheric air pollution in summer and winter season. Environmental monitoring and assessment, 189(12), 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6319-2>.
- [8] X. Yun G. Shen, H. Shen, W. Meng, Y. Chen, H. Xu, S. Tao, Residential solid fuel emissions contribute significantly to air pollution and associated health impacts in China. Science advances, 6(44), eaba7621, 2020. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba7621>.
- [9] H. Erol, Ankara'da Hava Kirliliği ve Çözüm Yolları. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Türkiye, 1996.
- [10] E. Özşahin, İ. Eroğlu, H. Pekteznel, Keşan'da Edirne Hava Kirliliği. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (36), 83-100, 2016.
- [11] M. H. Morcalı, D.S. Akan, Kahramanmaraş hava kirliliği kaynaklarının izlenmesi ve belirlenmesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(2), 105-115, 2017. <https://doi.org/10.17780/ksujes.310602>.
- [12] A. Hamit, F. Yaşar, Ş. Altun, B. İşcan, Batman şehir merkezinde hava kirliliği ve kontrolü. Batman

- Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7(1/2), 48-55, 2017.
- [13] A.D. Buldur, S. Sarı, Sıcaklık Terselmesinin Hava Kirliliğine Etkisi: Isparta Şehir Merkezi Örneği. *Electronic Turkish Studies*, 13(2), 2018. <https://doi.org/10.7827/TurkishStudies.12858>.
- [14] F. Dadaşer Çelik, Ş.T. Azgın, Forecasting of Primary Air Pollutions: Emission Inventory Sample from Turkey. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 66-75, 2020. <https://doi.org/10.21324/dacd.584889>.
- [15] Kayseri İli Çevre Durum Raporları 2015-2019. <http://dozplayer.biz.tr/10112502-T-C-cevre-ve-sehircilik-bakanligi-kayseri-cevre-ve-sehircilik-il-mudurlugu-html>, Erişim 20 Nisan 2021.
- [16] BOTAŞ Genel Müdürlüğü. <http://www.botas.gov.tr/>. Erişim 20 Eylül 2021.
- [17] Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı. <http://www.havaizleme.gov.tr>, Erişim 29 Eylül 2021.
- [18] Kayseri İli Temiz Hava Eylem Planı 2014-2019. <http://dozplayer.biz.tr/10112502-T-C-cevre-ve-sehircilik-bakanligi-kayseri-cevre-ve-sehircilik-il-mudurlugu-html>, Erişim 15 Nisan 2021.
- [19] Z. İpek, İ. Uyanık, Sanayi Kaynaklı Noktasal Emisyonların Hava Kalitesine Katkısı: Kayseri İli Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8 (2), 341-350, 2022. <https://doi.org/10.21324/dacd.1056806>.
- [20] Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı Veri İşletimi, Veri Validasyonu ve Raporlama, Retrieved 2022, from <http://www.haliccevre.com/images/PDF/s-19.pdf>. Erişim Tarihi 20 Nisan 2021.
- [21] CITEPA (Centre Interprofessional Technique de la Pollution Atmospherique), Corinair Inventory-Default emission factors handbook, 2nd Edition. CEC-DGXI, Paris, 1992.
- [22] Emep/CORINAIR, Emission Inventory Guidebook – 2009. Combustion in Energy & Transformation Industries, Retrieved 2010. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>. Erişim 1 Nisan 2021.
- [23] T. İnandı, M. Canciğer Eltaş, B. Kerman, Türkiye’de Havadaki PM10 ve SO2 Duzeyindeki Değişimler, 2005-2015, *Türkiye Klinikleri J Med Sci* 2018;38(3):209-17, 2017. <https://doi.org/10.5336/medsci.2017-57594>.
- [24] K. Ulutaş, A.F. Alkarkhi, S.K. Abujayyab, S.S.A. Amr, Multivariate Analysis for Air Contamination and Meteorological Parameters in Zonguldak, Turkey. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 16(4) 2022.
- [25] E. Zeyney, F. Yerdelen Tatoğlu, and T. Akarsu, A statistical evaluation of the effect of natural gas usage for urban heating on the air quality of Erzurum City via SO2 ve PM10. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(6), 869-880, 2022. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.83548>.
- [26] J.Yang, Z. Ji, S. Kang, Q. Zhang, X. Chen, S.Y. Lee, Spatiotemporal variations of air pollutants in western China and their relationship to meteorological factors and emission sources. *Environmental Pollution*, 254, 112952.2020.<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.120>.





Mobilya sektöründe satış sonrası hizmetler bölümünde veri madenciliği uygulaması

Data mining application in after sales services department in furniture industry

Ali Karakuş¹, Mehmet Duran Toksarı^{2*}

^{1,2} Erciyes Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri Türkiye

Öz

Bu çalışmada mobilya sektöründe satış sonrası hizmetler alanında müşterilerin yedek parçalı çağrılarında (yedek parça kullanarak tamir-bakım yapma süreci) daha kısa sürede cevap vererek (yani yedek parçalarını daha kısa sürede tedarik edip ilgili bölgesine sevk ederek) daha kısa sürede ürünlerine tamir-bakım işlemlerini gerçekleştirmek ve böylece müşteri memnuniyetini artırmak amaçlanmıştır. Aynı çağrı numarasının altındaki tüm yedek parçalar bölgeye ulaştıktan sonra müşterinin sorunlu olan ürününün tamirini ancak yapılabilir. Aynı çağrı numarası altında birlikte sipariş olarak çekilen kalemlerin tespiti Weka paket programı yardımıyla birliktelik analizi çıkarımı veri madenciliği uygulamasıyla yapılmıştır. Her geçen gün büyük önem kazanan ve en az üretim kadar büyük öneme sahip olduğu artık herkes tarafından kabul edilen satış sonrası hizmetler sektöründe müşteri memnuniyetini artırmak için birliktelik analizi yapılarak yedek parça stok tutma uygulaması bu alanda yapılan bir ilk uygulamadır. Birliktelik analizi çalışmasının oldukça farklı uygulama ve kullanım alanları da vardır. Bu çalışma sonunda depodan yedek parça toplama süresinde %19,3'lük bir iyileşme sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Mobilya sektörü, Satış sonrası hizmetler, Veri madenciliği, Birliktelik analizi

1 Giriş

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ve buna bağlı olarak bilgiye erişim kaynaklı bilgi birikiminin artmasının bir sonucu olarak işletmelerin ürettiği ürünler arasındaki farklılıkların azaldığı, rekabetin hiç olmadığı kadar fazla olduğu bir sürece girilmiştir. Bu süreçte işletmeler varlıklarını sürdürebilmeleri adına yeni farklı arayışlara girmişlerdir. Satış sonrası hizmetler (SSH), bu süreçte işletmelerin marka devamlılığını sağlamaları ve marka olarak var olabilmeleri adına yatırım yaptıkları, çok önemsedikleri bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

Her sektörde olduğu gibi mobilya sektöründe de müşteri memnuniyeti açısından SSH'nin çok büyük önemi vardır. Mobilya müşteriler tarafından seyrek zamanlı, yüksek fiyatlı ve konfor beklentisi esasıyla satın alınan dayanıklı tüketim ürünüdür [1]. Bu nedenle müşteriler satın almış oldukları mobilya ürününün kullanımı sürecinde karşılaşılabilecekleri sorunlara daha hızlı çözüm bulabilen, sıcak satış

Abstract

In the field of after-sales services in the furniture sector, it is aimed to increase customer satisfaction by responding to customers' calls for spare parts (repair-maintenance process using spare parts) in a shorter time, that is, by supplying spare parts in a shorter time and sending them to the relevant region, by performing repair-maintenance operations on their products in a shorter time. After all spare parts under the same call number reach the area, the customer's problematic product can only be repaired. The determination of the items that were taken together as an order under the same call number was made with the help of the Weka package program, with the help of data mining association analysis application. In order to increase customer satisfaction in the after-sales services sector, which is gaining importance day by day and is now accepted by everyone as being as important as production, the practice of keeping spare parts stock by making association analysis is the first application in this field. The association analysis study also has quite different application and usage areas. At the end of this study, an improvement of 19.3% was achieved in the spare part collection time from the warehouse.

Keywords: Furniture industry, After sales services, Data mining, Association analysis

gerçekleştikten sonra da satmış olduğu ürünlerin arkasında durabilen markaları tercih etmekte. Bu sebeplerden dolayı, bu çalışmada üründe sorun olan müşterinin sorununu daha hızlı çözüme kavuşturmak için yedek parça tedarik sürecini hızlandırmak adına birliktelik analizi uygulaması yapılmıştır.

SSH sürecinin iyileştirilmesi, geliştirilmesi adına literatürde yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada Türkiye'de mobilya sektörünün öncü markalarının SSH faaliyetlerini yürüten bir firmada SSH süreçlerinin iyileştirilmesi, müşteri memnuniyet oranlarının artması adına yedek parça deposunda yürütülen veri madenciliği (VM) birliktelik analizi uygulaması sunulmaktadır.

Bu çalışmada; VM birliktelik analizi uygulaması ile hem işletme yedek parça depo düzeninde, hem de işletmenin yedek parça sevk süreçlerinde gözle görülür iyileştirmeler yapılmıştır. Yapılan bu iyileştirmelerin işletme süreçlerine katkıları işletmenin verimliliğine yansımıştır. Bu durumda ilk etapta işletme yedek parça depo sürecinde (yedek parça

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dtoksari@erciyes.edu.tr. (M. D. Toksarı)

Geliş / Received: 25.10.2022 Kabul / Accepted: 16.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1193513

depo kabulü, toplama, sarım/paketleme, sevkiyat) ciddi iyileşmeler olmuştur. Yeni depo yerleşimi ile yedek parçayı toplayan elemanların daha rahat ve daha kısa sürede ilgili yedek parçaya depoda ulaşmaları sağlanmıştır. Bununla birlikte daha kısa sürede hazır edim yapılmış olan yedek parçaların ilgili bölgelere/müşterilere de sevklere daha erken olmuştur. Bu çalışma sayesinde şikâyetine bir an evvel çözüm bekleyen müşteriler daha kısa sürede yedek parçaların taraflarına ulaşmaları ile şikâyetlerine daha hızlı çözüm bulmuşlardır.

2 Literatür taraması

Literatürde hem SSH hem de birliktelik analizi üzerine çalışmalar bulunmamaktadır. SSH ile ilgili yapılan çalışmalar daha sınırlı olmasına rağmen birliktelik analizi üzerine çalışmalar oldukça fazladır.

2.1 Satış sonrası hizmetler ile alakalı literatürde yapılmış çalışmalar

Türedi [1] çalışmasında; SSH, mobilya satın alma sıklıkları, gelir seviyeleri vb. kriterleri içeren anket çalışması gerçekleştirmiştir. Bu anket çalışmasında tüketicilerin satış sonrası hizmetlerden yararlanma oranları analiz etmiştir.

Çıranoğlu [2] çalışmasında ise mobilya sektöründe SSH'den duyulan müşteri memnuniyet oranı ile ürünün algılanan değeri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır.

Çelik ve Bengül [3] çalışmalarında; ürün garantileri ve satış sonrası hizmetlerin marka sadakati üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İlgili araştırmanın neticesinde hem ürün garantilerinin hem de SSH bileşenlerinin marka sadakatini belirleyen faktörler üzerinde dolaylı ve dolaysız etkilerinin olduğunu tespit etmişlerdir.

Çelik [4] çalışmasında ise otomotiv sektöründe satış sonrası hizmetlerin müşteri memnuniyeti üzerine etkilerini araştırmıştır. Yetkili servislerle özel servislerin vermiş olduğu satış sonrası hizmetlerin maliyetlerini karşılaştırmıştır. 500 müşteri üzerinden yapmış olduğu anket sonuçlarında otomotiv sektöründe SSH kalitesinin daha yüksek düzeyde ve sürdürülebilir olması için 15 maddeden oluşan önerilerini de çalışmanın sonuç kısmında belirtmiştir.

Şengün [5] yapmış olduğu çalışmasında elektrikli süpürge kullanıcıları için müşteri memnuniyeti indeksi modelini analiz etmek adına Yapısal Eşitlik Modellemesini kullanmıştır. İlgili model; firma imajı, müşteri beklentisi, algılanan kalite, müşteri memnuniyeti ve müşteri sadakati kavramlarından oluşmaktadır. Bu çalışmada farklı markalarda elektrikli süpürge kullanan 297 kişiye anket yapılmış, anket sonuçları analiz edilmiştir.

Bekturgan [6], otomotiv sektöründe satış sonrası hizmetlerin marka bağımlılığı üzerindeki önemini analiz eden bir çalışma yapmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda, marka bağımlılığı üzerinde müşteri şikâyetleri, garanti faaliyetleri ve yetkili servis ağları pozitif anlamlı etkiye sahipken bakım-onarım faaliyetleri, ürün kurulumu ve teknik eğitimi ise anlamlı bilgiye sahip olmadığı sonucuna ulaşmıştır.

Taşdemir [7] çalışmasında satış sonrası hizmetlerin müşteri tatminine etkisini araştırmak amacıyla 2019 yılında 300 ehliyet sahibi katılımcının anket sonuçlarını SPSS programı yardımıyla analiz etmiştir.

Sarıkulak'ın [8] 2019 yılında uluslararası pazarlarda faaliyet gösteren 133 firmaya yapmış olduğu anket çalışması ile uluslararası pazarlarda faaliyet yapan işletmelerin satış sonrası hizmetlerine yardımcı olan distribütörlerin vermiş oldukları hizmet kaliteleri ile firmaların verilen bu hizmet kalitesinden duymuş oldukları tatmin ve sadakat arasındaki ilişkiyi ölçmüştür.

Mermertaş [9], internet sitelerinden alışveriş yapan 379 kişiden anket yoluyla veri toplamış ve toplanan anket verilerine SPSS hazır paket programı yardımıyla çeşitli istatistiksel çalışmalar yapmıştır.

Okumuş [10] çalışmasında çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan Konjoint analizi yöntemini kullanarak Türkiye İş Makinesi Sektöründe satış sonrası hizmetler faaliyetlerini analiz etmiş, ekonomik krizin müşteri tercihlerinde değişikliğe sebebiyet verdiği sonucuna ulaşmıştır.

Gönüller [11], otomotiv endüstrisi satış sonrası hizmetler sektöründe hizmet veren firmalar için müşteri sadakati ve boyutları arasındaki ilişkileri "yapısal eşitlik modeli" ile analiz etmiş ve bunun sonucu olarak da bir ölçme modeli önermiştir.

Khankışhiyeva ve Yıldırım [12] satış sonrası müşteri hizmetlerinin marka bağlılığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada kadınların ürün satın alımında erkeklere göre markaya daha çok önem verdikleri sonucuna ulaşmışlar ve ayrıca ürün tercihinde markaya yönelme davranışının müşterilerin gelir düzeylerinden bağımsız olduklarını tespit etmişlerdir.

Bayır [13], online alışveriş sitelerini kullanarak alışveriş yapan 418 adet Y kuşağı tüketicisine anket yapmıştır. Yapmış olduğu anket sonuçlarını SPSS programını kullanarak analiz etmiş, ilgili anket sonuçlarına güvenilirlik ve tutarlılık analizleri yapmış, doğrulayıcı faktör analizi (DFA) ölçüm modeline göre sonuçları yorumlamış ve PATH (yol) modeli analizi yapmıştır.

Yolver [14], İstanbul ile özelinde (kent ölçeğinde) dayanıklı tüketim sektöründe karlılığı maksimize edecek, maliyeti minimize edecek, kapasiteyi maksimum seviyede kullanarak müşteri beklentilerini karşılayacak bir satış sonrası servis ağı tasarımı yapmıştır.

Özgören [15], yapmış olduğu literatür çalışması ile elde etmiş olduğu bilgileri Sony Ericsson müşteri hizmetleri yetkilisinin vermiş olduğu bilgilerin ışığında ilgili firmada satış sonrası hizmetin avantajlarını, satış sonrası hizmet yöntemlerini ve satış sonrası hizmet stratejilerini ele almış, literatürle firma gerçeklerini karşılaştırmıştır.

Özgüner ve Kurtuldu [16] çalışmalarında; otomotiv sektöründe yetkili servislerde verilen satış sonrası hizmetlerin müşteri memnuniyetindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırma sonuçlarında, satıştan sonra verilen servis hizmetlerinin alt bileşenleri ile müşteri memnuniyet seviyeleri arasında anlamlı ilişkiler tespit etmişlerdir.

Yıldırım [17] yapmış olduğu çalışmada otomobil kullanıcılarının satış öncesi ve satış sonrası müşteri hizmetlerinin müşterilerin sadakatine olan etkilerini incelemiştir.

Akyüz [18], mobilya satış mağazalarında müşteri ilişkileri yönetimi üzerine bir araştırma yapmış ve bu çalışmada Trabzon ili özelinde 45 mobilya mağaza yetkilisine yapmış olduğu anketin sonuçlarını istatistiki olarak analiz etmiştir. Yapılan bu analizlerin sonucunda Akyüz [18], satış sonrası müşteri hizmetlerinde yedek parça tedarikinin, müşteri şikâyetlerine çözüm odaklı hızlı geri dönüşlerin ve dağıtımda herkesin kalite kontrol süreçlerine katılmasının önemli olduğu sonucuna varmıştır.

Duman [19], güvenlik sistemleri kullanan/kullanacak 400 kişiye yapmış olduğu anket sonuçlarını analiz etmiştir. Yapmış olduğu analizlerde müşteri memnuniyeti ve satış sonrası müşteri ilişkileri hizmetlerinin müşteri sadakati üzerinde anlamlı pozitif etkiye sahip olduğu tespitini istatistiki olarak sunmuştur.

Mehmet [20] çalışmasında; Bursa ili özelinde mobilya tercihinde etkili olan faktörleri analiz etmiştir. Bu çalışma kapsamında 372 kişiyle anket yapmış ve anket sonuçlarını SPSS paket programı yardımıyla analiz etmiştir.

Sümer [21] ise çalışmasında; ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sektöründe faaliyetlerini sürdüren firmaların satış sonrası hizmet kalitelerinin müşteri memnuniyeti ve fazla fiyat ödemeye etkilerini analiz etmiştir.

2.2 Birliktelik kuralı ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar

Birliktelik kural analizi ile ilgili literatürde yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Farklı sektörlerde ve alanlarda birliktelik kuralı algoritmaları yoğun olarak kullanılmaktadır.

Sabah ve Bayraktar [22] yapmış oldukları çalışmada; VM tekniklerinden birliktelik kuralı Apriori algoritmasını kullanarak hem Weka hem de Orange VM programları yardımıyla bir ilçede yer alan 2112 binanın sözel ve mekânsal özniteliklerini analiz etmişler ve birliktelik kuralları bulmuşlardır. Her iki paket programından elde edilen veriler arasında bağlantılar sunulmuştur.

Doğan [23] çalışmasında, bir e-ticaret sitesini kullanan kullanıcıların yaş, bölge, cinsiyet, şifre karmaşıklığı ve şifre uzunluğu değişkenleri üzerinden Weka'da Predictive Apriori algoritmasını kullanarak birliktelik analizi yapmıştır.

Erdem ve Özdağoğlu [24] yapmış oldukları çalışmada, Ege Bölgesi'nde bir araştırma ve uygulama hastanesinin acil servisine başvuru yapan acil servis hastalarının hastane kayıtlarını (geliş tarihi-saati, ayrılış tarihi-saati, cinsiyeti, tanı kodu-açıklaması vb.) Apriori algoritmasını kullanarak birliktelik analizi yapmışlardır.

Eker vd. [25] yapmış oldukları çalışmada VM hakkında genel bilgi sunarak, Apriori algoritması kullanılarak Türkiye'de yapılan farklı çalışmaları/uygulamaları çalışmalarında derlemiştir.

Tokyürek ve Yüzgeç [26] Weka'da bir mağazanın 217 farklı ürün ve 4627 kayıttan oluşan satış verisine Apriori ve FP-Growth algoritmalarını kullanarak birliktelik kural analizleri uygulamışlar, Apriori ve FP-Growth algoritmalarının Weka programında çalışma sürelerini kıyaslamışlardır.

Alaeddinoğlu vd. [27] Van Gölü su seviyesini etkileyen faktörlerden oluşan zamansal ve mekânsal veri kümesine

Apriori algoritması yardımıyla zamansal ve mekânsal birliktelik kuralları türetmişlerdir. Elde etmiş oldukları birliktelik kurallarını yorumlayarak zaman içerisinde göl su seviyesini etkileyen faktörlerin ne tür bir etkileşim sonucu göl su seviyesini artıracak veya azaltacağını tahmin etmişlerdir.

Karabrahimoğlu [28] Konya Meram Tıp Fakültesi Onkoloji Bölümünde meme kanseri teşhisi ile tedavi gören 1371 kişiye ait 40 değişkenli hasta verilerini Apriori ve GRI algoritmaları ile birliktelik kural analizi yapmıştır. Apriori algoritması ile elde edilen sonuçları hem GRI algoritması ile hem de Lojistik regresyon yöntemi ile kıyaslamıştır.

Tontuş [29] kamuya ait bir fabrikanın bakım-onarım işlerini yürüten bölümünde arıza bakım ve onarımında kullanılan sarf malzemelerin kullanım yerlerini beş alt gruba (elektrik, elektronik vb.) ayırmış ve ayrıca beş yıllık dönemi içeren sarf malzeme kullanım verilerini toplamıştır. İlgili veri setine SPSS Modeller yazılımı yardımı ile Apriori algoritması kullanarak birliktelik analizi yapmış, beş alt grup ve bir bütün (beş grubun oluşturduğu) olarak birlikte sarf edilen malzemeleri tespit etmiştir.

Koç ve Karabatak [30] sosyal ağların öğrenciler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Fırat Üniversitesi Bilgisayar Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenim gören 145 öğrenciye 26 sorudan oluşan anket yapmışlar ve elde ettikleri anket sonuçlarına VM birliktelik kuralı tekniğini uygulamışlardır.

Değirmenci [31] çalışmasında 2012 yılı TÜİK'in Hanehalkı Bütçe Araştırması verilerine kümeleme ve birliktelik analizi uygulamıştır. İlgili çalışmada 9987 adet hanenin harcama kalemi tüketimindeki birliktelik kurallarını tespit etmiş ve yorumlamıştır.

Jiang vd. [32] Çin'de gıda örnekleme maliyetinin çok yüksek olmasından dolayı yapmış oldukları çalışmada örnekleme sayısını azaltarak gıda numunesi alma maliyetini düşürecek bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada birliktelik kurallarını analiz etmek için Weka hazır paket programı yardımıyla Apriori algoritmasını kullanılmışlardır.

Ningsih vd. [33] bir kütüphaneyi ziyaret eden ve kütüphaneden ödünç kitap alan öğrencilerin sıklıkla ödünç aldıkları kitaplara ait verileri incelemişler, VM birliktelik analizi Apriori algoritmasını kullanarak öğrencilere ödünç verilen kitaplardaki birliktelik kurallarını tespit etmişlerdir.

Jawthari ve Stoffa [34] birliktelik kurallarını kullanarak uzaktan eğitimde öğrenci katılımı ve demografik ilişki ilişkilendirme ile alakalı bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, öğrenci katılımına demografik özellikleri bağlayan bir dizi kurallar elde etmek için Apriori algoritmasını kullanmışlardır.

Ferooz vd. [35] yapmış oldukları çalışmada Pakistan'ın Lahor şehrinde işlenen suçlardan oluşan suç veri setini kullanarak suçların oluşum kalıplarını tespit etmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında kümeleme ve birliktelik kural analizi yaklaşımlarını kullanmışlardır. Ferooz vd. [35] Apriori algoritmasını gelecekte belirli bir gün, saat ve yerde sık olarak meydana gelebilecek suç faaliyeti kalıplarını çıkarmak için kullanmışlardır.

Chakraborty vd. [36] yapmış oldukları çalışmada bir diş hekiminin 75 farklı diş hastasına reçete etmiş olduğu farklı

ilaç türlerinin ortalama sayısını ve maliyetini belirlemek için birliktelik kural analizi yaklaşımını kullanmışlardır.

Drias ve Drias [37] sosyal medya kullanıcıları üzerinde Covid-19 bağlamında bir VM çalışması yapmışlardır. Kullanıcılar tarafından gönderilen tweet'lerden oluşan bir Covid-19 veri kümesine birliktelik kuralı yaklaşımını uygulamışlardır.

Wang [38] yapmış olduğu çalışmada Çin'de tıp alanında internetteki tıbbi mahremiyet konusunu ele almıştır. Hastaların mahremiyetini ifşa eden faktörleri araştırmak ve hastaların ifşa davranışlarını tahmin etmek için klasik ve geliştirilmiş çok boyutlu Apriori algoritmasını kullanmıştır.

Abdelfattah vd. [39] yapmış oldukları çalışmada Fas'taki farklı binalarda enerji tüketimi açısından tüketicilerin davranışlarını modellemiştir. Yapılan çalışma ile bir tüketicinin enerji tüketimi ve ev aletlerinin kullanım durumlarını analiz etmişler, birliktelik kural çıkarımları yapmışlardır.

Xia ve Ruan [40] yapmış oldukları çalışmada Çin'de büyük bir şehir olan Hangzhou'da bulunan 2320 adet park alanı ile alakalı birliktelik analizi yapmışlardır. Akıllı arabaların ve ortak sürüşün geliştirilmesi ile parka olan talep düşmüştür. Xia ve Ruan [40] çalışmalarında mevcut park yerlerinin yeniden kullanımı ile ilgili olarak bu park yerleri arasındaki mekânsal ortak yerleşim ilişkilerini analiz ederek birliktelik kural çıkarımları sunmuşlardır.

Rezaei vd. [41] İran Ziraat Bankası tarafından yürütülen müşterilerin yaşam boyu değerlerinin hesaplanması ve farklı kanallardaki müşteri davranışının analizi için birliktelik kuralı yaklaşımını kullanmışlardır.

Gakii vd. [42] yapmış oldukları çalışmada gözlemlerden daha fazla özneliğe sahip olan yüksek boyutlu verilerin analizini yapmışlardır. Yüksek boyutlu veri içeren 2 farklı akciğer kanseri veri kümesinden oluşan veri setlerine öznelik seçimi için öncelikle temel bileşen analizi, özyinelemeli özellik seçimi ve grafik tabanlı yaklaşım çalışmalarını yapmışlardır.

3 Materyal ve metod

Bu bölümde çalışmanın uygulama konusu olan VM ele alınacaktır. Veri madenciliğinin literatürde yapılmış farklı tanımları hakkında bilgi verildikten sonra VM yöntemleri, VM uygulama alanları, WEKA programı ve VM hakkında bilgi verilecek, çalışmanın ana konusu olan Birliktelik Analizi hakkında detaylar sunulacaktır.

3.1 Veri madenciliği

VM, büyük veri yığınlarından çeşitli istatistiksel tekniklerle ve matematiksel algoritmalarla anlamlı, yararlı veriler çıkarma işi olarak tanımlanabilir. Diğer bir ifade ile VM, büyük ölçekli veriler arasından anlamlı, yararlı bilgiye ulaşma yani bilgiyi madenleme işidir. Literatürde, VM ile alakalı yapılmış olan tanımlamalardan bazıları aşağıdaki sunulmuştur;

VM, büyük ölçekli verilerden faydalı bilgi ve ilginç kalıpları/örüntüleri çıkarma sürecidir [43]. VM kendi başına bir çözüm değil, nihai çözüme ulaşmak ve sağlıklı karar verebilmek adına karar vermemize yardımcı olacak, gerekli ve faydalı bilgileri elde etmeye yarayan bir araçtır [44]. VM, işletmelerde kararlar verilirken kullanılması adına yani daha

sağlıklı/doğru karar vermek adına büyük ölçekli veri tabanlarından geçerli, uygulanabilir ve daha önceden bilgi sahibi olunmayan, bilinmeyen bilgilerin çıkarılma işidir [45]. VM, büyük ham veri kümesinden kullanılabilir verileri elde etmek için kullanılan bir süreçtir. Bir veya daha fazla yazılım yardımıyla büyük veri yığınlarındaki bilgi örüntülerini/kalıplarını bulur ve analiz eder [46]. VM, şirketlerin sorunlarını çözmesine, olası riskleri minimize etmesine ve yeni fırsatlar yakalamasına imkân sağlayan iş zekâsını keşfetmek adına büyük hacimli verileri analiz etme süreci olarak tanımlanabilir [47]. VM temel olarak veri setleri içerisindeki daha önceden fark edilmemiş, bilinmeyen/bilinmemiş veri desenlerini/düzenlerini bilgisayar yazılımları aracılığıyla belirleme işi olarak tanımlanabilir [48]. VM ifadesi büyük veri setindeki kullanılabilir örneklerin bulunmasını belirtir. VM, veri setlerinden veri analizleri ve keşif algoritmaları ile modeller ve örnekler üretir. Bu modeller ve örnekler bazı doğruluk oranları ile yeni veriye uygulanabilir olmalıdır [49]. VM, değişik/farklı kaynaklardan farklı şekillerde/yöntemlerde elde edilen veriler üzerinde işlem yaparak anlamlı/yararlı bilgilerin elde edilme işlemidir [50]. VM, büyük hacimli veri setlerinden enteresan örüntüler bulma ve faydalı bilgiyi keşfetme sürecidir. VM işlemi; işlemler, düz dosyalar, fotoğraflar vb. gibi ham verilerden bilgileri ayıklayarak, verileri ön işleme tabi tutarak işletme için yararlı raporlar, bilgiler oluşturur [51].

3.2 Veri madenciliği yöntemleri

VM modelleri temel olarak sınıflandırma, kümeleme ve birliktelik kuralları olmak üzere 3 ana başlık altında gruplandırılabilir [53].

3.2.1 Sınıflandırma

Sınıflandırma, veri madenciliği süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bir metod olmakla birlikte veri setlerindeki gizli kalmış kalıpları tespit etmekte kullanılır. Veri setlerini sınıflandırmak için belirli bir süreç vardır. Veri setindeki verilerin bir kısmı algoritmada eğitim amaçlı kalan veriler ise test amaçlı kullanılır. Algoritma eğitim veri setinden verideki saklı olan örüntüyü keşfeder ve daha sonra elde ettiği kurallar sayesinde test veri setindeki verileri sınıflara ayırır [53].

Belli ölçütlere göre verilerin ayrıştırılması olarak sınıflandırmanın tanımlaması yapılabilir [24].

3.2.2 Kümeleme

Kümeleme yöntemi birbirlerine benzeyen veri setindeki verileri ayırma, ayrıştırma şeklinde tanımlanabilir. Kümeleme yöntemlerinin çoğunda veri setindeki veriler arası uzaklıklar kullanılır. Bu uzaklıkları hesaplamak ve verilerin hangi kümede yer alacağına karar vermek için Öklid, Manhattan ve Minkowski uzaklık hesaplama yöntemleri kullanılır. Kümeleme yöntemleri, hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemleri olarak ikiye ayrılır. En yakın komşu algoritması ve en uzak komşu algoritması hiyerarşik kümeleme yöntemlerinde kullanılırken, k-ortalama yöntemleri hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemleri arasında yer alır [53].

Öngörüm yapılacak alanların tespiti ve birbirlerine benzeyen veri setlerinin alt kümelerine ayrıştırılma işlemi kümeleme olarak tanımlanabilir [24].

3.2.3 Birliktelik kuralları

Birliktelik analizi, genel manada daha önceden belirlenmiş bir destek ve güven eşik değeri kullanarak birlikte sık olarak görülen verilerin, kayıtların, satışların tespit edilip analiz edilme işlemine denir. Destek ve güven eşik değerlerinin yardımıyla veri kümesi içerisindeki çok önemli ilişkiler keşfedilebilir ve birliktelikler bulunabilir [22].

Bir arada yani birlikte meydana gelen olaylardaki örüntüleri bulmak/çözmek VM kapsamına girmektedir. Örnek verecek olursak bir giyim mağazasından takım elbise alan müşterilerin %75'inin aynı alışverişte gömlek satın aldıklarını söyleyebilmek, bu birlikte gerçekleşen işlemlere örnek olarak verilebilir. Mağaza yetkilileri birlikte satın alınan ürünleri (bu örnekte takım elbise ve gömlek gibi) mağaza içinde birbirine yakın raflara koyarak satışların artmasına katkı sağlamış olurlar [53].

Birliktelik kuralları ilk olarak 1993 yılında Agrawal, Imielinski ve Swami tarafından geliştirilmiştir. Birliktelik kuralları, bazı açılarından sınıflandırma kurallarına benzerdir. Sınıflandırma algoritmalarında veri setindeki sınıf değişkeninin diğer değişkenlere göre durumunu, sınıfını belirlerken, birliktelikte sınıf değişkeni olmaz [23].

Bu çalışmada birliktelik kuralı algoritması olarak Apriori kullanılacak ve Weka yazılımından faydalanılacaktır.

Birliktelik kural madenciliği iki adımdan meydana gelen bir süreç olarak tanımlanabilir [54];

- Sık tekrar eden birliktelik kümelerinin tamamının bulunması: Kümelerin her biri belirlenmiş minimum destek sayısı kadar tekrar edecektir.
- Minimum destek ve minimum güven değerlerini sağlayacak sık tekrar eden kümeler baz alınarak güven oranı yüksek birliktelik kurallarının türetilmesi.

3.3 Birliktelik kural analizi

Bu bölümde Apriori algoritması, algoritmanın gereksinimleri ve algoritma kural değerlendirme metrikleri hakkında bilgi verilecektir.

3.3.1 Apriori algoritması

Birliktelik kural analizinde birçok yöntem tercih edilmektedir. Bunlar içinde en fazla kullanımı olan yöntem Apriori algoritmasıdır. Bu algoritmanın adımları aşağıda sunulmuştur [53]:

- Öncelikli olarak destek ve güven ölçütlerini karşılaştırarak karar verip analiz yapmak için minimum destek ve minimum güven değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Uygulama sonuçlarının belirlenen bu eşik değerlerine eşit ya da büyük olması gerekmektedir.
- Çözümlemeye dâhil edilecek veri setindeki her bir malzeme/ürün için tekrar sayıları başka bir ifade ile destek sayıları hesaplanmalıdır. Hesaplanan bu destek sayıları ile eşik destek değeri (minimum eşik)

karşılaştırılır ve eşik destek değerinden küçük değerlere sahip kayıtlar çözümlemeye dâhil edilmez. Eşik destek değerine eşit ve büyük değerlere sahip olan kayıtlar ise çözümlemede dikkate alınır.

- Ürün setindeki ürünler bu seferinde ikişerli olarak gruplandırılır. Her bir grubun tekrar sayıları diğer bir ifade ile destek sayıları bulunur. Yine yukarıdaki adımda belirtildiği gibi bu destek sayıları eşik destek değeri ile karşılaştırılır. Eşik destek değerinden büyük ve eşit değerlere sahip satırlar ile işleme devam edilir, diğerleri çözümlemeye dâhil edilmez.
- Bu adımda ise ürünler üçerli, dörderli, beşerli vb. gruplandırmalar yapılarak yukarıda belirtilen eşik destek değeri karşılaştırması yapılır. Eşik destek değerinden büyük ve eşit olan kayıtlarla işleme devam edilir.
- Bu işlemlerin sonucunda ürün grupları tespit edilir. Kural destek ölçütü baz alınarak birliktelik kuralları oluşturulur ve oluşturulan her bir kural ile ilgili olarak güven ölçütleri hesaplaması yapılır.

Birliktelik kural analizinin çok yaygın olarak kullanıldığı alan perakende satışları olup tüketicilerin satın alma eğilimlerini belirlemek, müşterilerin birlikte satın aldığı ürünleri tespit ederek ilgili ürünlerin birbirlerine yakın raflara konmasını sağlayarak satışların artması hedeflenmektedir. Bu bağlamda yapılan bu çalışmalara Market Sepet Analizi adı da verilmektedir.

3.3.2 Algoritmanın gereksinimleri

Algoritma ile alakalı gereksinimler aşağıdaki sunulmuştur.

- Birliktelik analizi yapılacak veri setindeki veriler kategorik/nominal yapıda olmalıdır. Kategorik veri için örnek verecek olursak; bir kişinin eğitim durumu (lise, lisans, yüksek lisans, doktora), cinsiyeti (kadın, erkek), gelir düzeyi (düşük, orta, yüksek), kıyafet beden ölçüsü (S, M, L, XL, XXL) ve medeni durumu (evli, bekâr, dul, boşanmış) gösterilebilir.
- Kullanılacak olan veri setinin formu Tabular ya da Transactional yapıya sahip olmalıdır. Tabular veri setindeki veriler sütun bazlı tutulurken, Transactional veriler satır bazlı olarak veri tabında tutulur.
- Veri setindeki değişkenlerin yönleri in, out veya both şeklinde tanımlanmalıdır [55].
- Birliktelik kuralı analizinde iki veya daha fazla işlemin/olayın aynı anda gerçekleşme olasılıkları hesaplandığından veri kümesinden sadece bir adet işlemliler/olaylı ürünler/kayıtlar silinmelidir.
- Ayrıca sadece bir adet olarak satış yapılan/işlem gören üründe veri setinden silinmelidir.
- Apriori algoritması minimum Destek (Support) ve minimum Güven (Confidence) değerlerini baz alarak çalışmaktadır. Yani destek ve güven değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

3.3.3 Algoritma kural değerlendirme metrikleri

Birliktelik kural gösterimi şu şekilde yapılır. A ürününü alan bir müşterinin B ürünü de alma durumu yani birliktelikleri birliktelik kuralı olarak $A \Rightarrow B$ biçiminde gösterilir [56]. Birliktelik kuralı iki bölümden oluşmaktadır. Kuralın sol kısmı yani ilk bölümü (A) “Öncül” ve sağ kısmı yani ikinci kısmı (B) “Ardıl” veya bağlı kısım olarak tanımlanır. Bu iki bölüm arasındaki ilişkiler IF-THEN (Eğer-Sonra) döngüleri kullanılarak birliktelik analizi yapılır.

Birliktelik kuralı üretirken genelde destek ve güven ölçütlerinden faydalanılır. Ancak diğer faydalanılan ölçütler de aşağıda sunulmuştur.

Destek (Support): Maksimum olması istenir, kuralın sıklığını gösterir. Aşağıdaki formüldeki Sayı (A, B) destek sayısı A ve B ürün gruplarını birlikte kapsayan alışveriş sayısını gösterirken N ise yapılan tüm alışverişlerin sayısını göstermektedir. **Denklem (1)** destek değerini verir.

$$Destek(A \Rightarrow B) = \frac{Sayı(A, B)}{N} \quad (1)$$

Güven (Confidence): Maksimum olması istenir, kuralın gücünü gösterir/ölçer. A ve B ürün gruplarının birlikte satın alınması olasılığını gösteren güven ölçütü aşağıdaki gibi hesaplanır [50]. Apriori algoritması sonucu ortaya çıkan her bir kural güven kriterleri (confidence) ile belirtilir ve güven kriteri birliktelik kurallarının doğruluğunu belirtir [52]. Bir örnek verecek olursak; tüketici baza ürün grubu (A ürünü) satın aldığı anda aynı zamanda başlık ürün grubu (B ürünü) de satın almıştır şeklinde birliktelik kuralımız olduğunu varsayalım. Bu kural için güven değeri, baza alındığında başlık almanın koşullu olasılığıdır. Eğer 1000 tüketici baza almış ve bunların 800’ü de aynı zamanda başlık almışsa, baza ürün grubu alındığında başlık ürün grubunu almanın güven değeri bu birliktelik kuralı için $800/1000=0,80$ (yani 0,80) olarak hesaplanır.

Güven değeri ($0 \leq \text{Güven} \leq 1$) 0 ile 1 arası bir değer alır [25]. **Denklem (2)** güven değerini verir.

$$Güven(A \Rightarrow B) = \frac{Sayı(A, B)}{Sayı(A)} \quad (2)$$

İlginçlik (Lift): Bu değer 1’e eşit olması ilginçlik olmadığını ve 1’den farklı olması ise ilginçliği gösterir [57]. Kuralın ilginçliğini ölçmekte kullanılan bir ölçüttür. **Denklem (3)** ilginçlik değerini verir.

$$İlginçlik = \frac{Sayı(A, B)}{Sayı(A) \times Sayı(B)} \quad (3)$$

Kanıt (Conviction): 1’e eşit ise A ve B bağımsızdır, kural oluşturulmaz. 1’den farklı ise bağımlıdır, kural oluşturulabilir. **Denklem (4)** kanıt değerini verir.

$$Kanıt = \frac{1 - Sayı(B)}{1 - Sayı(A, B)} \quad (4)$$

Güç (Leverage): A ve B’nin birlikte satılmasının ayrı ayrı satılmasından ne kadar fazla olduğunu gösterir. **Denklem (5)** güç değerini verir.

$$Güç = Sayı(A, B) - Sayı(A) \times Sayı(B) \quad (5)$$

Destek ve Güven ölçütlerini daha net anlayabilmek adına örnek olarak, A ve B ürünleri arasında aşağıdaki değerlere sahip bir birliktelik kuralı olsun.

$$A \Rightarrow B \text{ [Destek=}\%5, \text{Güven=}\%90]$$

Destek değeri %5 demek, satış yapılan/analiz edilen tüm ürünlerin %5’inde A ve B ürünlerinin birlikte satıldığını ifade etmektedir.

%90 Güven değeri ise A ürünü satın alan müşterilerin %90’ının aynı alışverişte B ürünü de satın aldığı ifade etmektedir.

Bir birliktelik analizinde destek değeri ve güven değerleri arttıkça oluşan kural sayısında azalmalar görülür. Tam tersi bir durum da geçerlidir. Şöyle ki; birliktelik analizinde destek ve güven değerleri azaldıkça oluşan kural sayısı artar. Ancak destek ve güven değerleri düşmesi birliktelik kuralının gücünün zayıflamasına neden olur.

Birliktelik kuralı analizi sonucu çıkan birliktelikleri değerlendirmek, anlamak oldukça kolaydır. Artan kural sayısına bağlı olarak birliktelik kurallarının anlaşılabilirliğinde azalmalar olur [26].

4 Problemin tanımı

Günümüzde işletmeler müşteri taleplerini karşılamak ve müşterilerini memnun etmek adına firma olarak neredeyse tüm imkânlarını seferber etmektedir. Çalışma yapılan firmanın SSH firması olması sebebiyle firmanın tüm yapmış olduğu faaliyetlerin odağında müşteri memnuniyeti hep bulunmaktadır. Firma; müşteri memnuniyetini geliştirmek, artırmak adına yapılan her türlü faaliyeti desteklemektedir.

Müşteri şikâyetlerini çözmek adına bölge servisleri tarafından ilgili firmaya çekilen siparişlerin zamanında/en kısa sürede bölge servislerine sevk edilmesi/ulaşması müşteri memnuniyetini artırmak adına ve yasal süre içerisinde ürün tamir-bakım işlemlerinin kapatılması için büyük önem taşımaktadır. Sorununa çok daha kısa sürede çözüm bulan müşteride markaya/firmaya olan bağlılık yani marka sadakati artacaktır.

Yedek parça siparişlerinin bölge servislerine daha kısa sürede gönderilmesi sürecinde işletme depo yönetimi, depo yerleşimi ve depo tertip-düzeni büyük öneme sahiptir. Doğru/sağlıklı tasarlanmamış/kurgulanmamış bir depo yönetim sistemi beraberinde sorunlar getirebilmektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki etkin bir depo tasarımı işletme verimini artırmada önemli bir rol oynamaktadır

Müşteri şikâyetlerini gidermek adına farklı malzeme sınıflarını içeren siparişler depoda hazırlanırken, malzemeler depodaki ilgili raflarından toplanırken depo tertip-düzeni, yedek parçaların depo ve raflardaki konumları sipariş hazırlama/toplama sürecini doğrudan olumlu/olumsuz etkilemektedir. Şöyle ki; hareketi fazla olan malzemelerin depoda ulaşımı zor/uzak alanlara ve raflara konulması sipariş toplama süresini çok olumsuz etkileyecek, sipariş toplamak için kat edilen mesafeyi artıracaktır. Bu durumda depoda

sipariş toplama işini yapan çalışanların gün içerisindeki verimi düşecektir.

Depodaki yedek parçalar analiz edildiğinde bir yedek parçanın (malzemenin) depoda birden fazla rafta stoklandığı, depoda çoğu malzemelere erişimin kolay olmadığı, malzeme toplama adına aynı raf gözünde olan malzemelerin bile toplanmasında depo tertip-düzeni kaynaklı sorunlar olabildiği, hareketi fazla olan malzemelerin depoda birlikte ve deponun çıkışına yakın stoklanmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı sipariş hazırlık süresini kısaltmak, işletme kaynak kullanım verimliliğini artırmak adına işletmenin deposunda yeni ve etkin bir depo yerleşimine geçmek elzemdir. Yeni depo düzenlemesinde, birliktelik kuralı analizi ile işletmenin bölge servislerine satış yapmış olduğu yedek parçaların satışlardaki birlikteliklerini belirleyerek, birlikte satış olasılıkları yüksek olan, hareketi fazla olan malzemeleri birbirlerine yakın, ulaşımı kolay raflara ve depo giriş-çıkış noktalarına yakın alanlara yerleştirmek amaçlanmaktadır. Ayrıca depodan toplanan yedek parçaların paketlenmesi alan olan sarım/paketleme alanına uzaklıkları da minimum olacak şekilde (toplama-paketleme arası mesafeyi kısaltmak için) yerleşim yapılması gerektiği aşikârdır.

5 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde çalışılan verilerin elde edilmesi, problemin tanımı, algoritmanın uygulanması, algoritmanın sonuçları ve değerlendirilmesi, elde edilen sonuçlara göre depo yerleşimi hakkında bilgi verilecektir.

5.1 Verilerin elde edilmesi

Bu çalışmada döşemeli ürünler yedek parça deposundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Döşemeli ürün grubuna giren ürünler aşağıda verilmiştir;

- Oturma grubu (koltuk takımı, köşe koltuk, kanepeler / koltuk, berjer, markiz / puf, sehpa, orta sehpa, yan sehpa, zigon sehpa)
- Yatak, Baza ve Başlık
- Bahçe ve Balkon Mobilyası

Çalışma kapsamında 2022 yılı ilk 2 aylık dönem için yedek parça çıkışları baz alınmıştır. Ancak yedek parça çıkışlarındaki yıl bazlı durumu görmek için de 2021 yılı 12 aylık dönemde yedek parça çıkışları malzeme sınıfı ve malzeme alt sınıfı bazlı da analiz edilmiştir. 2022 yılı 2 aylık dönem çıkış verileri incelendiğinde ilgili veri setinde 31.909 kayıt (sıra) ve 44 öznitelik (sütun) bulunduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1’de 2022 yılı ilk 2 aylık dönem için ay bazlı yedek parça çıkışları satır sayısı bazlı (kalem bazlı) olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Yedek parça çıkışları-ay bazlı

Aylar	Kalem sayısı	Yüzde oran
Ocak	17 793	55.8
Şubat	14 116	44.2
Toplam	31 909	100.0

Tablo 2’de 2022 yılı ilk 2 aylık dönem için yedek parça çıkışları malzeme sınıfı bazlı olarak sunulmuştur.

Tablo 2. Malzeme sınıfı bazlı yedek parça çıkışları

#	Malzeme sınıfı	Kalem sayısı	Yüzde oran
1	Terzilik üretim kalemleri	11 147	34.9
2	Depo malzemesi	8 696	27.3
3	Sunta	4 097	12.8
4	Sehpa yedek parça	3 640	11.4
5	Terzilik yedek parça	1 781	5.6
6	Yatak ev tekstili	1 374	4.3
7	Süngerler	606	1.9
8	İhracat döşemeli işler	324	1.0
9	Yay yedek parça	244	0.8
	Toplam	31 909	100.0

Tablo 3’de 2022 yılı ilk 2 aylık dönem için işletme yedek parça çıkışları malzeme alt sınıfı bazlı olarak verilmiştir.

Tablo 3. Malzeme alt sınıfı bazlı yedek parça çıkışları

#	Malzeme alt sınıfı	Kalem sayısı	Yüzde oran
1	Terzilik üretim kalemleri	11 147	34.9
2	Kanepeler ayağı	5 068	15.9
3	Sunta	4 097	12.8
4	Sehpa üst tablası	2 297	7.2
5	Terzilik yedek parça	1 781	5.6
6	Yatak ev tekstili	1 374	4.3
7	Sehpa ayağı	855	2.7
8	Aksesuar paketi	742	2.3
9	Baza ızgarası	691	2.2
10	Süngerler	606	1.9
11	Aksesuar ayak ve içerikleri	415	1.3
12	Bağlantı elemanları	406	1.3
13	Kanepeler depo malzemesi	371	1.2
14	İhracat döşemeli işler	324	1.0
15	Sehpa mobilya aksamı	311	1.0
16	Yay yedek parça	244	0.8
17	Mekanizma	198	0.6
18	Mobilya malzemeleri	174	0.5
19	D-fason yedek parçalar	124	0.4
20	Metal iskelet	114	0.4
21	Makas	107	0.3
22	Amortisör	98	0.3
23	Klapa papel kontralar	93	0.3
24	Metal aksam	87	0.3
25	S-fason sehpa yedek parçalar	75	0.2
26	Ambalaj malzemeleri	46	0.1
27	SunElyKeceTelaYay	37	0.1
28	Sehpa yedek parça	8	0.0
29	Baza yedek parçası	8	0.0
30	Kimyasal malzemeler	7	0.0
31	İthal yedek parçalar	3	0.0
32	Sehpa metal iskelet	1	0.0
	Toplam	31 909	100.0

5.2 Algoritmanın uygulanması

Veri setine Weka yazılımı yardımı ile Birliktelik Analizi Apriori Algoritması uygulanmış olup, çıktı sonuçlarına örnek olarak 3 kurala ait yorumlar aşağıda sunulmuştur. Algoritma çıktısı Şekil 1’de verilmiştir.

Kural 1: Sunta=t Kanepede-ayagi=t Yatak-ev-tekstili=t 245 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 238 <conf:(0.97)> lift:(1.33) lev:(0.03) [59] conv:(8.3)

Kural 1'in Yorumu: Sunta, kanepede ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken %97 (238/245=0,97) güvenilirlikte terzilik üretim kalemi malzemesinden de sipariş gelmiştir.

Sunta, kanepede ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken terzilik üretim kalemi malzemesinden de sipariş gelmesini 1,33 (lift) kat artırmaktadır.

Sunta, kanepede ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken terzilik üretim kalemi malzemesinden de sipariş gelmesinin birbirleri ile 8,3 değeri ile ilişkilidir (conviction).

Sunta, kanepede ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken terzilik üretim kalemi malzemesinden de sipariş gelmesi, birbirlerinden bağımsız olarak yer almalarından 0,03 kadar daha fazladır (leverage).

Burada kuralın yanında görmüş olduğunuz 245 ve 238 rakamları bu kuralın tüm kural veri seti içerisinde 245'er defa ve 238'er defa birlikte görüldüğünü ifade etmektedir.

Kural 2: Sehpa-ust-tablasi=t Kanepede-ayagi=t Yatak-ev-tekstili=t 259 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 250 <conf:(0.97)> lift:(1.32) lev:(0.03) [61] conv:(7.02)

Kural 2'nin Yorumu: Sehpa üst tablası, kanepede ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken %97 (250/259=0,97) güvenilirlikte terzilik üretim kalemi malzemesinden de sipariş gelmiştir.

Kural 3: Terzilik-yedek-parca=t Kanepede-ayagi=t Yatak-ev-tekstili=t 234 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 225 <conf:(0.96)> lift:(1.32) lev:(0.02) [54] conv:(6.34)

Kural 3'ün Yorumu: Terzilik yedek parça, kanepede ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken %96 (225/234=0,96) güvenilirlikte terzilik üretim kalemi malzemesinden de sipariş gelmiştir.

Algoritma sonucu oluşturulan birliktelik kurallarının tümü incelendiğinde tahmin edilen birlikteliklerin yanında tahmin edilemeyen yani fark edilemeyen, gizli kalmış birlikteliklerin de ortaya çıkması önemlidir. Bu çalışma sonucu ortaya çıkan birliktelik kuralları değerlendirmeye

tabi tutulmuştur. Birliktelik kuralı sonucuna göre depoda yeni yerleşim yapılmıştır.

5.3 Elde edilen sonuçlara göre depo yerleşimi

Depolar tedarik zincir yönetimi içerisinde çok önemli bir yere sahiptir. Tüketicilerin talepleri çok büyük değişkenlikler gösterebilir; bazen sadece bir adet ürün veya yedek parça talep ederken bazen de çok miktarda ürün ve yedek parça talebinde bulunabilir. Tüketicilerin taleplerini anında karşılamak ve müşteri memnuniyeti sağlamak adına bahse konu ürün ve yedek parçaların optimum miktarlarda depolarda stoklanması büyük öneme sahiptir.

Uygulama çalışmasında ele alınan depoya depolama ve raf sistemleri açısından bakıldığında depo yerleşiminde sırt sırta raf sistemi mevcuttur. Rafın her iki yüzü farklı depo adreslerine sahip ve rafların her iki yüzü de kullanılmaktadır.

İlgili deponun stok yerleşim politikası rassal stok yerleşim politikası şeklindedir. Yani yedek parçalar mevcut depo alanına gelişigüzel bir şekilde, depo kabul işlemini yapan işçinin inisiyatifinde stoklanmaktadır. Depodaki sipariş toplama işlemlerinde kullanılan yaklaşım, depo personelinin depo içerisinde koridorlar arasında yürüyerek veya merdiven yardımıyla çıkış yapılan listedeki siparişleri/yedek parçaları toplaması şeklindedir.

Bahse konu yedek parça deposundaki yedek parçaların yeniden yerleşimi Birliktelik kural analizi sonucuna göre (Bölüm 3.3 ve Bölüm 5.2'de anlatıldığı üzere) yapılmıştır. Bu çalışmada Bölüm 5.1'de anlatıldığı üzere 31.909 adet kayıt (sıra) ve 44 öznitelik (sütun) kullanılmıştır. İlgili veriler 2022 yılı ilk 2 aylık dönem yedek parça satış verilerini içermektedir. Mobilya SSH yedek parça sevk süreci heterojen bir yapıya sahip olduğundan dolayı ideal zaman dilimi olan 2 aylık dönem yedek parça sevkleri bu çalışmada analiz edilmiştir. Yeni depo yerleşiminde birlikte sipariş çekilen, birlikte çıkış verilen ve yedek parça depodan birlikte toplanan ve sarılan malzemeler depoda birbirlerine yakın lokasyonlara konulmuşlardır.

Best rules found:

1. Sunta=t Kanepede-ayagi=t Yatak-ev-tekstili=t 245 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 238 <conf:(0.97)> lift:(1.33) lev:(0.03) [59] conv:(8.3)
2. Sehpa-ust-tablasi=t Kanepede-ayagi=t Yatak-ev-tekstili=t 259 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 250 <conf:(0.97)> lift:(1.32) lev:(0.03) [61] conv:(7.02)
3. Terzilik-yedek-parca=t Kanepede-ayagi=t Yatak-ev-tekstili=t 234 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 225 <conf:(0.96)> lift:(1.32) lev:(0.02) [54] conv:(6.34)
4. Terzilik-yedek-parca=t Yatak-ev-tekstili=t 263 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 252 <conf:(0.96)> lift:(1.31) lev:(0.03) [60] conv:(5.94)
5. Sunta=t Terzilik-yedek-parca=t Kanepede-ayagi=t 278 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 263 <conf:(0.95)> lift:(1.3) lev:(0.03) [60] conv:(4.71)
6. Sehpa-ust-tablasi=t Baza-izgarasi=t 238 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 225 <conf:(0.95)> lift:(1.3) lev:(0.02) [51] conv:(4.61)
7. Sehpa-ust-tablasi=t Yatak-ev-tekstili=t 285 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 269 <conf:(0.94)> lift:(1.29) lev:(0.03) [61] conv:(4.54)
8. Sunta=t Sehpa-ust-tablasi=t Kanepede-ayagi=t 331 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 312 <conf:(0.94)> lift:(1.29) lev:(0.03) [70] conv:(4.48)
9. Kanepede-ayagi=t Yatak-ev-tekstili=t 365 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 342 <conf:(0.94)> lift:(1.29) lev:(0.03) [75] conv:(4.12)
10. Sehpa-ust-tablasi=t Terzilik-yedek-parca=t Kanepede-ayagi=t 290 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 271 <conf:(0.93)> lift:(1.28) lev:(0.03) [59] conv:(3.93)
11. Baza-izgarasi=t Kanepede-ayagi=t 303 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 283 <conf:(0.93)> lift:(1.28) lev:(0.03) [62] conv:(3.91)
12. Sehpa-ust-tablasi=t Terzilik-uretim-kalemi=t Yatak-ev-tekstili=t 269 ==> Kanepede-ayagi=t 250 <conf:(0.93)> lift:(1.7) lev:(0.05) [103] conv:(6.11)
13. Sunta=t Sehpa-ust-tablasi=t 403 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 368 <conf:(0.91)> lift:(1.25) lev:(0.03) [74] conv:(3.03)
14. Sehpa-ust-tablasi=t Terzilik-yedek-parca=t 335 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 305 <conf:(0.91)> lift:(1.25) lev:(0.03) [60] conv:(2.93)
15. Sehpa-ust-tablasi=t Yatak-ev-tekstili=t 285 ==> Kanepede-ayagi=t 259 <conf:(0.91)> lift:(1.67) lev:(0.05) [103] conv:(4.8)
16. Sunta=t Yatak-ev-tekstili=t 310 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 281 <conf:(0.91)> lift:(1.24) lev:(0.02) [54] conv:(2.8)
17. Terzilik-yedek-parca=t Terzilik-uretim-kalemi=t Yatak-ev-tekstili=t 252 ==> Kanepede-ayagi=t 225 <conf:(0.89)> lift:(1.64) lev:(0.04) [87] conv:(4.09)
18. Terzilik-yedek-parca=t Yatak-ev-tekstili=t 263 ==> Kanepede-ayagi=t 234 <conf:(0.89)> lift:(1.63) lev:(0.04) [90] conv:(3.98)
19. Sehpa-ust-tablasi=t Terzilik-yedek-parca=t Terzilik-uretim-kalemi=t 305 ==> Kanepede-ayagi=t 271 <conf:(0.89)> lift:(1.63) lev:(0.05) [104] conv:(3.96)
20. Sunta=t Terzilik-yedek-parca=t 368 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 325 <conf:(0.88)> lift:(1.21) lev:(0.03) [56] conv:(2.27)
21. Terzilik-yedek-parca=t Kanepede-ayagi=t 470 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 415 <conf:(0.88)> lift:(1.21) lev:(0.03) [72] conv:(2.27)
22. Sunta=t Baza-izgarasi=t 255 ==> Terzilik-uretim-kalemi=t 224 <conf:(0.88)> lift:(1.2) lev:(0.02) [38] conv:(2.16)

Şekil 1. Apriori algoritma çıktısı en iyi 22 kural

Birliktelik analizi çalışmasının sonucunda “birlikte/yakında” depolanması gerektiği anlaşılan malzemelerin detaylı analizi yapılarak malzemelerin ürün/malzeme sınıfı bazlı kümelenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Servis yedek parça deposundaki tüm yedek parçaların aynen marketlerdeki ürün grupları mantığında (süt-kahvaltılık, şekerleme-kuruyemiş, gıda-yemek ürünleri vb.) düzenlemesine karar verilmiştir. Yapılan detaylı analizler neticesinde depo yedek parçaları “malzeme sınıfı” bazlı sınıflandırılmış ve SAP kurumsal kaynak planlama sistemine her bir malzeme için “malzeme sınıfı” verisi ana veri şeklinde eklenmiştir. Bu eklenen ana verinin SAP kurumsal kaynak planlama sistemindeki yedek parça ile alakalı çekilen tüm raporlara (satın alma raporu, ciro raporu, YPK raporu) da gelmesi sağlanmıştır. SAP sisteminde tanımlı tüm yedek parçaların “malzeme sınıfları” sisteme girilmiş ve döşemeli bölüm yedek parçalarının “malzeme sınıfları” aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- Terzilik Üretim Kalemleri
- Depo Malzemesi
- Sunta
- Sehpa Yedek Parça
- Terzilik Yedek Parça
- Yatak & Ev Tekstili
- Süngerler
- İhracat Döşemeli İşler
- Yay Yedek Parça

Birliktelik analizi sonucu birlikte çekilen siparişler yeni depo yerleşiminde aynı veya yakın lokasyonlara ve depo giriş-çıkış noktasına yakın lokasyonlara yerleştirilmiştir. Dolayısıyla yedek parça çıkışı yapıldığında listeyi depodan toplayan mavi yaka çalışanın depodaki malzemelere daha kısa sürede erişmesi ve malzemeyi daha kısa sürede toplaması sağlanmıştır. Hareketi fazla olan malzemelerin depolanmasında alt raflar (1. ve 2. raflar/katlar) tercih edilmiş ve böylece depodan toplanmalarında forklift veya merdiven kullanımına gerek kalmamıştır.

Birliktelik analizi sonucu ortaya çıkan ilk 117 birliktelik kuralı incelendiğinde sehpa üst tablası (%7.2), sunta (%12.8), kanepa ayağı (%15.9), yatak ev tekstili (%4.3), terzilik üretim kalemi (%34.9), terzilik yedek parça (%5.6), baza ızgarası (%2.2), aksesuar paketi (%2.3) ve sehpa ayağı (%2.7) malzeme alt sınıflarının depoda birlikte stoklanması gerektiği görülmüştür. Bahse konu bu malzemeler marka ve hareket durumu bazlı olarak da analiz edilmiş ve ilgili depo adreslerine yerleştirilmiştir.

6 Sonuçlar

Bu çalışma ile SSH hizmeti veren bir işletmenin yedek parça deposunda yedek parça toplama süresini iyileştirmek adına Weka yazılımı yardımıyla birliktelik analizi çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda birlikte işletmeye siparişi düşen yedek parçalar tespit edilmiş ve ilgili yedek parçalara kolay ulaşım sağlanması adına bu yedek parçalar depoda aynı/yakın depo raf gözlerinde depolanmıştır. Ayrıca

hareketi ve birlikteliği fazla olan malzemelerin sipariş toplama süresini kısaltmak adına ilgili malzemeler depo giriş-çıkış alanına yakın lokasyonlara/gözlere de yerleştirilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda sunta, kanepa ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken %97 güvenilirlikte terzilik üretim kalemi malzemesinden sipariş geldiği ve ayrıca sehpa üst tablası, kanepa ayağı ve yatak ev tekstili malzemelerinden sipariş gelirken %97 güvenilirlikte ise terzilik üretim kalemi malzemesinden de sipariş geldiği sonucuna varılmış ve yedek parça depoda bu malzemeler birliklerine yakın konumda depolanmışlardır. Diğer algoritma sonucu birlikte depolanması gereken malzemeler de bu mantıkla depolanmıştır.

Depodan toplanan yedek parçaların paketleme alanına daha kısa sürede ulaşması için yedek parça paketleme alanı depo girişine yakın bir alana taşındı. Depo girişi ile yedek parça paketleme alanı uzaklığı bu çalışma ile 22 metreden 2 metreye düşürülmüştür. Böylelikle depodan toplanan yedek parçaların daha kısa yürüme mesafesinde sarım alanına ulaşması sağlanmıştır.

Yapılan iyileştirmelerin amacına ulaşıp ulaşmadığını tespit etmek için yedek parça toplama zaman etütleri yeniden alınmış, eski ve yeni yedek parça toplama süreleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen birliktelik kural analizi sonucuna göre yapılan yeni depo yerleşiminden sonra yedek parçanın depo raflarından toplama süresi 2.69 dakika/adet’den 2,17 dakika/adet’e düşürülmüştür. Bu çalışma sonucunda yedek parça toplama süresinde %19.3’lük bir iyileştirmenin/azalmanın gerçekleştiği görülmüştür. Yeni depo düzeni uygulaması ile 1-2 ay çalıştıktan sonra tekrardan zaman etüdü alınması durumunda bu iyileşme oranının daha da artacağı tahmin edilmektedir. %19.3’lük yedek parça toplama süresindeki iyileşme süreçlere olumlu yönde katkı sağlayacak ve müşterilere daha erken yedek parça gönderimi yapılacaktır. Bununla birlikte yedek parça toplama ve paketleme süresi toplamında %15’lik bir iyileşme sağlandığı görülmektedir.

Detaylı yapılan satış verileri analizinde hareketi fazla olan malzemelerin 1-1.5 yıl boyunca hareketi fazla olan hareket durumunu koruduğu görülmüştür. Bu nedenle satış verileri (yedek parça sevkleri) zamanla dereceli bozulma göstereceğinden dolayı yani zamanla “hareketi fazla” olan malzemeler, “hareketi az” statüsüne düşmesinden kaynaklı bu çalışmanın işletmeye sağlamış olduğu katkının devamlılığı için çalışmanın 1.5 yıllık yeni/güncel satış verileri ile tekrarlanması gerekmektedir. Yedek parça satış verileri incelendiğinde satışı fazla olan, seriye yeni girmiş ürünlere ait yedek parçaların depoda hareketinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Seriden kalkmış/iptal statüsündeki tüm ürün gruplarına ait yedek parça hareketlerinin ise ya çok az ya da hiç olmadığı yani malzemelerin âtil durumda olduğu belirlenmiştir. Bu durum da beklenen ve doğal bir durumdur. Bu dezavantajlı görünen durumu avantajlı duruma getirmek adına birliktelik kural analizi sonucu ortaya çıkan birliktelik örüntülerini “malzeme sınıfı” bazlı analiz edildiğinde aynı malzeme sınıfına giren malzemelerin depoda birbirlerine yakın stoklandığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla birliktelik

kural analizi sonucu ortaya çıkan “birlikte/yakın olacak” yedek parçalar birbirlerine yakın lokasyonlarda stoklanmak kaydıyla “malzeme sınıfı” bazlı depoda yeni yerleşim de yapılmıştır. Örnek verilecek olursa sehpa satın almış olan bir müşterinin ürünündeki sorun var ise sehpa ile alakalı (sehpa üst tablası, sehpa ayağı vb.) servise yedek parça siparişi vereceğinden dolayı depodaki ana yerleşim malzeme sınıfı bazlı ve alt kırılım ise “malzeme alt kırılımı” bazlı yapılmıştır.

Yedek parça deposunda satış verileri baz alınarak yapılan bu birliktelik kural analizi çıkarımı işletme iade ve müşteri şikayetleri verilerine de rahatlıkla uygulanabilir, böylece işletme için faydalı, kullanışlı, anlamlı, geçerli ve uygulanabilir, aksiyon alınabilir gizli kalmış örüntüler/birliktelikler elde edilebilir. Bu tip faydalı ilişkiler işletme için paha biçilmez değerinde sonuçların ortaya çıkmasına sebep olacak kararların alınmasına katkı sağlayacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %22

Kaynaklar

- [1] H. Türedi, Zonguldak İli mobilya sektöründe satış sonrası hizmet üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.
- [2] M. Cıranoglu, Mobilya sektöründe satış sonrası hizmetlerin ürünlerin değer algıları üzerine etkisi: Bursa ili İnegöl ilçesinde bir alan çalışması. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 5 (3): 783-796, 2018. <https://doi.org/10.30798/makuiibf.419239>.
- [3] H. Çelik, S.S., Bengül, Satış sonrası hizmetler ve ürün garantilerinin müşteri tatmini, memnuniyeti ve marka sadakati üzerindeki etkileri. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 26 (2): 105-120, 2008.
- [4] M. Çelik, Otomotiv sektöründe satış sonrası hizmetlerin müşteri memnuniyeti üzerine araştırma; bir yetkili servis örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Okan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [5] A. M. Şengün, Elektrikli süpürge sektörü için müşteri memnuniyeti indeksi modeli: kısmi en küçük karelerle yapısal eşitlik modelleme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [6] N. Bekturgan, Satış sonrası müşteri hizmetlerinin müşterilerin marka bağlılıkları üzerindeki etkisi: otomotiv sektöründe bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [7] C. Taşdemir, Satış sonrası müşteri hizmetlerinin müşteri tatminine etkisi: otomotiv sektöründe bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [8] Y. Sarıkulak, Uluslararası pazarlarda satış sonrası hizmet sunan distribütörlerin hizmet kalitesi ve firma memnuniyeti: makina imalat sanayinde bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2019.
- [9] K. Mermertaş, E-perakende sektöründe satış sonrası hizmetlerin müşteri tatmini ve tekrar satın alma niyetine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2020.
- [10] D. Okumuş, Türkiye iş makineleri sektörü satış sonrası hizmetlerinde müşteri tercihlerinin belirlenmesi, kriz öncesi ve sonrasında kıyaslanması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [11] Ş. Gönüller, Satış sonrası hizmetlerde müşteri sadakatinin öncülleri: Otomotiv sektöründe bir araştırma. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2016.
- [12] T. Khankishiyeva, G. Yıldırım, Satış sonrası müşteri hizmetlerinin marka bağlılığı üzerindeki etkisi. İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi, 12 (1), 55-69, 2020.
- [13] T. Bayır, Online alışverişlerde satış sonrası hizmetler ile e-sadakat ilişkisinde, e-memnuniyet aracılık rolü: Y kuşağı tüketicileri üzerine bir araştırma. Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi, 13 (33): 221-235, 2022. <https://doi.org/10.21076/vizyoner.876077>
- [14] E. Yolver, Dayanıklı tüketim sektöründe satış sonrası servis ağı tasarımı: İstanbul İli için bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [15] Ö.G.F. Özgören, Satış sonrası hizmetin müşteri sadakatine etkisi ve Erisson örneği. Marmara Sosyal Araştırmalar Dergisi, 0 (2): 1-23, 2014.
- [16] Z. Özgüner, H.S. Kurtuldu, Yetkili servislerde verilen satış sonrası hizmetlerin, müşteri memnuniyetine etkisi: İstanbul ili otomotiv sektöründe bir uygulama. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 5 (2): 569-589, 2015.
- [17] S.C. Yıldırım, Satış öncesi ve satış sonrası müşteri hizmetlerinin müşteri sadakati üzerindeki etkisinin karşılaştırılması. Bitlis Eren Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 3 (2): 65-84, 2014.
- [18] İ. Akyüz, Mobilya satış mağazalarında müşteri ilişkileri yönetimi üzerine bir araştırma. Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 5 (2): 113-123, 2011.
- [19] E. Duman, Müşteri sadakatini güçlendirmede satış sonrası hizmetlerin rolü. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [20] R. Mehmet, Mobilya tercihinde etkili olan faktörler: bursa ilinde bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Van, Türkiye, 2019.
- [21] B.A. Sümer, Hizmet kalitesinin müşteri memnuniyeti ve fazla fiyat ödeme istekliliği üzerindeki olası etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi,

- Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [22] L. Sabah, H. Bayraktar, Veri madenciliği birliktelik kuralları ile binaların risk durumlarının analizi: Kaynaşlı, Düzce örneği. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6 (1): 70-78, 2020.
- [23] O. Doğan, Bir e-ticaret sitesi kullanıcı hesaplarında şifre yapılarının birliktelik kuralları ile incelenmesi. Journal of Internet Applications and Management, 6 (2): 49-61, 2015. <https://doi.org/10.5505/iuyd.2015.29491>
- [24] Y. Demirok, Birliktelik kuralı yöntemleri ile E-ticaret satışlarının analizi. Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [25] M. E. Eker, R. Oktaş, G. Kayhan, Apriori algoritması ve Türkiye'deki örnek uygulamaları. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2015.
- [26] E. Tokyürek, U. Yüzgeç, Weka ile birliktelik kural çıkarım algoritmaları kullanılarak market sepet analizi, 631-636, Uluslararası Bilim ve Akademi Kongresi'18, Konya, Türkiye, Aralık 2018.
- [27] M. F. Alaeddinoğlu, T. Aydın, D. Dal, Birliktelik kuralları ile mekânsal-zamansal veri madenciliği. EÜFBED – Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5 (2): 191-212, 2012.
- [28] A. Karabrahimoğlu, Veri madenciliğinden birliktelik kuralı ile onkoloji verilerinin analiz edilmesi: Meram Tıp Fakültesi onkoloji örneği. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2014.
- [29] H. Tontuş, Sarf malzeme kullanımından veri madenciliği birliktelik kurallarının elde edilmesi, kuralların analizi ve sınıflandırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2020.
- [30] M. Koç, M. Karabatak, Sosyal ağların öğrenciler üzerindeki etkisinin veri madenciliği kullanılarak incelenmesi. E-Journal of New World Sciences Academy, 7 (1): 155-164, 2012.
- [31] T. Değirmenci, Resmi İstatistiklerde Veri Madenciliği Yaklaşımı. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 2014.
- [32] T. Jiang, X. Chen, H. Jiang, Association analysis in food sampling inspection data. In MATEC Web of Conferences, 355, EDP Sciences, 2022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202235502033>
- [33] A. Y. Ningsih, V. Sihombing, S. P. Sitorus, Implementation of a priori algorithm for book lending at state high school library I Silima Pungaga-Punga Parongil. Sinkron: jurnal dan penelitian teknik informatika, 7(1), 196-203, 2022. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i1.11257>
- [34] M. Jawthari, V. Stoffa, Relation between Student Engagement and Demographic Characteristics in Distance Learning Using Association Rules. Electronics 2022, 11, 724, 2022. <https://doi.org/10.3390/electronics11050724>
- [35] F. Ferooz, M. T. Hassan, S. Mahmood, H. Asim, M. Idrees, M. Assam, A. Mohamed, E-A. Attia, Risk and pattern analysis of Pakistani crime data using unsupervised learning techniques. Appl. Sci. 2022, 12, 3675. <https://doi.org/10.3390/app12073675>
- [36] S. Chakraborty, B. Mallick, S. Chakraborty, Mining of association rules for treatment of dental diseases. Journal of Decision Analytics and Intelligent Computing, 2(1), 1-11, 2022. <https://doi.org/10.31181/jdaic10028042022c>
- [37] Y. Drias, H. Drias, Sentiment Evolution Analysis and Association Rule Mining for COVID-19 Tweets, 2022. https://doi.org/10.33847/2712-8148.2.2_1
- [38] Y. Wang, Internet medical privacy disclosure mining and prediction model construction based on association rules. tehnički vjesnik, 29(1), 231-238, 2022.
- [39] A. Abdelfattah, A. Ahmed, L. Maha, B. A. Hussain, Energy Consumption Patterns and Inter-Appliance Associations using Data Mining Techniques. In E3S Web of Conferences, 336, 00040. EDP Sciences. 2022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233600040>
- [40] B. Xia, Y. Ruan, Function replacement decision-making for parking space renewal based on association rules mining. Land, 11(2), 156, 2022. <https://doi.org/10.3390/land11020156>
- [41] M. Rezaei, A. Sanayei, S. F. Amiri, A. Ansari, Improving the omnichannel customers' lifetime value using association rules data mining: a case study of Agriculture Bank of Iran. Iranian Journal of Management Studies, 15(1), 49-68, 2022.
- [42] C. Gakii, P. O. Mireji, R. Rimiru, Graph based feature selection for reduction of dimensionality in next-generation RNA sequencing datasets. Algorithms, 15(1), 21, 2022.
- [43] J. Han, M. Kamber, J. Pei, Data mining: concepts and techniques, third edition, Morgan Kaufmann Publishers, 3rd Ed., San Francisco, USA, 2011.
- [44] S. Kulluk, Karınca koloni optimizasyonu ile yapay sinir ağlarından kural çıkarımı. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 2009.
- [45] G. Silahtaroglu, Veri madenciliği kavram ve algoritmaları. Papatya Yayıncılık ve Eğitim, İstanbul, 2013.
- [46] The Economic Times., (Web Sayfası: <https://m.economictimes.com/definition/data-minig/amp>), (Erişim Tarihi: Mart 2022)
- [47] Talend., (Web Sayfası: <https://www.talend.com/resources/what-is-data-mining/>), (Erişim Tarihi: Mart 2022)
- [48] Ö. Akgöbek, F. Çakır, Veri madenciliğinde bir uzman sistem tasarımı, 801-806, Akademik Bilişim '09, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye, 11-13 Şubat 2009.
- [49] F. Gürbüz, L. Özbakır, H. Yapıcı, Türkiye'de bir havayolu işletmesine ait parça söküm raporlarına ilişkin veri madenciliği uygulaması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24 (1): 73-78, 2020.

- [50] Ş. E. Şeker, İş zekası ve veri madenciliği (Weka ile). Cinius, İstanbul, 2013.
- [51] Software Testing Help., (Web Sayfası: <https://www.softwaretestinghelp.com/data-mining-process/>), (Erişim Tarihi: Mart 2022)
- [52] M. Albayrak, The use of data mining in scientific research. International Journal of Social Sciences and Education Research, 3 (2): 751-760, 2017.
- [53] Y. Özkan, Veri Madenciliği yöntemleri. Papatya Yayıncılık. İstanbul, 2016.
- [54] A. Oğuzlar, Veri madenciliğinde birliktelik kuralları. Öneri Dergisi, 6 (22): 315-321, 2004.
- [55] Veri Bilimi Okulu., (Web Sayfası: <https://www.veribilimiokulu.com/associationrulesanal-ysis/>), (Erişim Tarihi: Mart 2022)
- [56] R. Agrawal, T. Imielinski, A. Swami, Mining association rules between sets of items in large databases, 207-216, Proceeding of the 1993 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Washington DC, 25-28 May 1993.
- [57] Y. Ateş, M. Karabatak, Nicel birliktelik kuralları için çoklu minimum destek değeri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29 (2): 57-65, 2017.





An advanced Salp Swarm Algorithm for optimization problems

Optimizasyon problemleri için Gelişmiş Salp Sürüsü Algoritması

Bahaeddin Türkoğlu^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir University, Computer Engineering Department, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

The Salp Swarm Algorithm (SSA) is a metaheuristic optimization algorithm inspired by Salp swarms' biological characteristics and colony strategies. There is a wide variety of studies conducted with SSA in the literature. These studies have revealed some significant disadvantages of SSA, the most critical being the imbalance of exploration and exploitation. In this study, an equilibrium operator has been developed using the Ikeda map. Thanks to this enhancement, the performance of the SSA algorithm has increased, and issues such as premature convergence and local optima have been overcome. To evaluate the proposed method, ten fixed-dimension benchmark problems and three engineering design optimization problems were solved. The proposed method is validated by comparing four well-known metaheuristic approaches and the original SSA. Experimental results demonstrated that the proposed method outperforms the compared methods.

Keywords: Salp Swarm Algorithm, Engineering design problem, Global optimization

1 Introduction

Optimization is the process of determining the most suitable solution among the possible solutions, considering given constraints. In today's world, optimization is widely applied in various domains aiming for maximum efficiency with minimum cost [1]. Many real-world problems such as vehicle and flight route planning [2], traveling salesman problems [3, 4], economic load dispatch [5], wind turbine [6] and facility layout problems [7], land consolidation [8], energy forecasting analysis [9], and engineering design problems, can be formulated as optimization problems [10-12].

The literature introduces various strategies to solve optimization problems, and one prominent approach is metaheuristic methods. Metaheuristic methods initiate the search process with random initial solutions and utilize two fundamental search behaviors: exploration and exploitation, aiming to find the optimal solution. Exploration represents the ability of a method to search the solution space, while the exploitation mechanism refers to the capacity to improve a solution. These two processes are crucial for metaheuristic methods and must be carefully designed to strike an ideal balance [13].

Öz

Salp Sürüsü Algoritması (SSA), Salp sürülerinin biyolojik özelliklerinden ve koloni stratejilerinden ilham alarak geliştirilmiş metasezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Literatürde SSA ile yapılmış çok çeşitli çalışmalar vardır. Bu çalışmalarda SSA'nın temel dezavantajlarının olduğu vurgulanmıştır. Bunlardan en önemlisi keşif ve sömürü dengesizliğidir. Bu çalışmada Ikeda haritası kullanılarak bir denge operatörü geliştirilmiştir. Bu geliştirme sayesinde SSA algoritmasının performansı artırılarak erken yakınsama ve lokal minimumlara takılma sorunu giderilmeye çalışılmıştır. Önerilen yöntemin başarısını değerlendirmek için on sabit boyutlu benchmark seti ve üç iyi bilinen mühendislik optimizasyon problemi çözülmüştür. Geliştirilen yöntemin güvenilirliği dört iyi bilinen metasezgisel yaklaşımla ve orijinal SSA ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, önerilen yöntemin kıyaslanan yöntemlerden daha performanslı olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Salp Sürüsü Algoritması, Mühendislik tasarımı problemleri, Global optimizasyon

In metaheuristic approaches, especially in the last decade, nature-inspired optimization methods have been developed and become popular. Swarm intelligence optimization is an artificial intelligence optimization technique that models the life behaviors of swarms, where individuals in the swarm, such as cheetahs, vultures, snakes, gorillas, and fruit flies, interact by sharing information. The popularity of swarm intelligence optimization algorithms stems from their effective performance in solving complex real-world problems. One of the key factors contributing to their successful performance is the utilization of collective location update mechanisms and processes inspired by natural events and living organisms in nature. These mechanisms aid in exploring the solution space and improving existing solutions [14].

In the literature, several nature-inspired metaheuristic optimization algorithms have been introduced, such as the cheetah optimizer (CO) [15], elephant clan optimization (ECO) [16], artificial gorilla troops optimizer (GTO) [17], snake optimizer (SO) [18], African vultures optimization algorithm (AVOA) [19], remora optimization algorithm (ROA) [20], artificial hummingbird algorithm (AHA) [21], white shark optimizer (WSO) [22], marine predators

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bturkoglu@ktun.edu.tr (B. Türkoğlu)

Geliş / Received: 26.10.2022 Kabul / Accepted: 29.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1195013

algorithm (MPA) [23], orca predation algorithms (OPA) [24], and Salp swarm algorithm (SSA) [25].

One of the main motivations of this study is the "No Free Lunch" (NFL) theorem, frequently mentioned in optimization problems. Although numerous optimization techniques are available in the literature, new algorithms are constantly being introduced, and existing algorithms require further development. This is due to the NFL theorem, which states that it is impossible for a single optimization algorithm to universally solve all optimization problems [26, 27].

This paper introduced the advanced SSA algorithm using the equilibrium operator with the Ikeda chaotic map.

The continuation of the study is organized as follows.

In the second part (Materials and Methods), the original SSA and the advanced SSA algorithms are explained and detailed. The experimental setup is presented in the third part of the study. Additionally, the experimental results are analyzed in this section. In the fourth part (Conclusion), the importance of the proposed SSA is discussed. Furthermore, this part presents conclusions and recommendations for future work.

2 Material and methods

This section will present the original SSA method and our proposed approach, the advanced SSA. Additionally, we will provide details about the experimental setup employed in our study.

2.1 Original Salp Swarm Algorithm

Salps are jelly-like sea creatures that belong to the Salpidae family. Although their bodies resemble jellyfish, their movement patterns are quite similar. Salps exhibit swarm behavior, and one of their most fascinating behaviors is forming long chains of interconnected individuals, in the depths of the ocean, as illustrated in Figure 1.

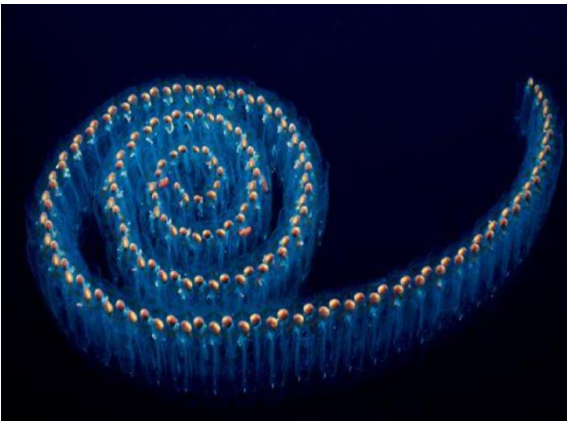


Figure 1. Figures of salp chain [28]

The Salp Algorithm comprises two types of salps: leader and follower salps. The leader salp takes the lead while the follower salps, and trails behind. Salps exhibit a specific behavior called salp chain, which is used for foraging [25]. Figure 2 provides a representative illustration of this behavior.

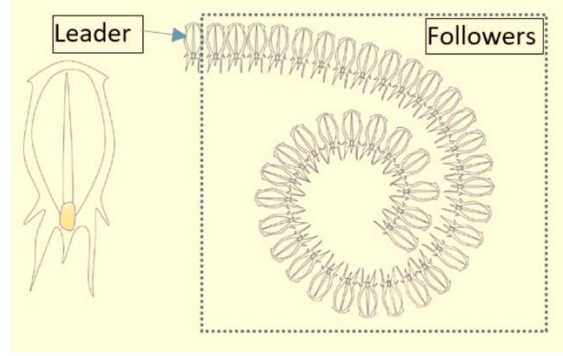


Figure 2. Illustration of salp behavior

The position update equation of the salps is shown in Equations (1).

$$x_j^i = \begin{cases} F_j + c_1((ub_j - lb_j) * c_2 + lb_j), & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - c_1((ub_j - lb_j) * c_2 + lb_j), & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

In the equation provided:

- x_j^i represents the position of the leader salp in the j th dimension.
- F_j represents the position of the food source in the j th dimension.
- c_1 , c_2 , and c_3 are randomly generated variables evenly distributed in the range [0,1].
- ub_j and lb_j represent the upper and lower limits in the j th dimension.

The algorithm described is considered a metaheuristic algorithm that exhibits early convergence. Various hybrid versions have been developed in the literature to address this issue. These hybrid versions have been applied to solve various real-world problems across different domains [29].

2.2 Advanced Salp Swarm Algorithm

Salps are transparent fish species measuring 1-10 cm in length. These organisms feed on plankton, earning them the nickname "ghost fish." The Salp Swarm Algorithm is a metaheuristic optimization algorithm inspired by the foraging and feeding behaviors of these creatures in the ocean. Three critical parameters affect the SSA's performance: c_1 , c_2 , and c_3 . The c_1 and c_2 parameters significantly impact the position update, while the c_3 parameter is responsible for the strategy used to update the next position of the Salp. [25].

The randomly generated c_3 parameter decides how to update the Salp's location. In this study, instead of allowing the c_3 parameter to decrease randomly, it is regulated using Ikeda chaotic mapping. The value produced by the chaotic map determines which location update mechanisms will be activated. The Ikeda chaotic map is depicted in Figure 3.

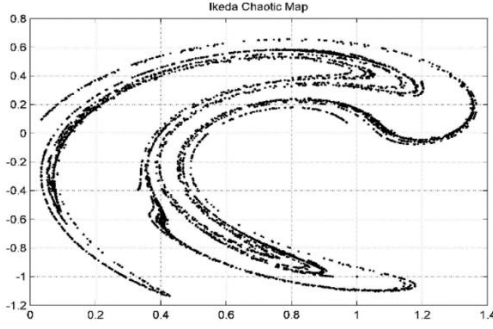


Figure 3. Image of Ikeda map [30]

The formulation of the Ikeda chaotic map is shown in Equations (2).

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= 1 + U(x_k \cos t_k - y_k \sin t_k), U = 0.8 \\ y_{k+1} &= U(x_k \cos t_k + y_k \sin t_k) \\ t_k &= 0.4 - 6/(1 + x_k^2 + y_k^2) \end{aligned} \quad (2)$$

The new position update equation of the salps, incorporating the values generated by the Ikeda chaotic map (*Ikeda maps*), is shown in Equations (3).

if *Ikeda map(chaotic value)* < 0.5 then

$$F_j - c_1 \left((ub_j - lb_j) * c_2 + lb_j \right) \quad (3)$$

else

$$F_j + c_1 \left((ub_j - lb_j) * c_2 + lb_j \right)$$

end if

3 Result and discussion

This section will first explain the benchmark test functions and real-world engineering design optimization problems. Then, the experimental study environment and experimental results will be detailed.

3.1 Experimental setup

To demonstrate the reliability of the algorithms developed in the literature, testing them on optimization problems with diverse characteristics is essential. Classical benchmark function sets and real-world engineering optimization problems are widely accepted in the literature for evaluating global optimization problems [21, 23, 25, 31-34]. This section is divided into two subsections. The first subsection provides a detailed explanation of the classic benchmark test functions. The second subsection focuses on real-world engineering problems solved using the developed method.

3.1.1 Benchmark functions

Ten popular benchmark function sets of different difficulty levels were used to test and validate the developed approach. These functions possess a fixed dimension and exhibit multimodal characteristics, meaning they contain multiple local minimums and a single global minimum. Including multimodal functions allows for evaluating the algorithm's capability to escape local minimums and assess its convergence rate. A representation of these benchmark test functions can be found in Table 1.

Table 1. Description of benchmark functions

No	Equation
F1	$F_1(x) = \left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6} \right)^{-1}$
F2	$F_2(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_i)}{b_i^2 + b_i x_3 x_4} \right]^2$
F3	$F_3(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$
F4	$F_4(x) = \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6 \right)^2 + 10 \left(1 - \frac{1}{8\pi} \right) \cos x_1 + 10$
F5	$F_5(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)]$ $* [30 + (2x_1 - 3x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$
F6	$F_6(x) = - \sum_{i=1}^4 c_i \exp \left(- \sum_{j=1}^3 a_{ij} (x_j - p_{ij})^2 \right)$
F7	$F_7(x) = - \sum_{i=1}^4 c_i \exp \left(- \sum_{j=1}^6 a_{ij} (x_j - p_{ij})^2 \right)$
F8	$F_8(x) = - \sum_{i=1}^5 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$
F9	$F_9(x) = - \sum_{i=1}^7 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$
F10	$F_{10}(x) = - \sum_{i=1}^{10} [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$

These function properties are shown in Table 2.

Table 2. Properties of fixed-dimension benchmark functions

No	Name	Min	Range	Dim
F1	Foxholes	1	[-65,65]	2
F2	Kowalik	0.00030	[-5,5]	4
F3	Six Hump Camel	-1.0316	[-5,5]	2
F4	Branin	0.398	[-5,5]	2
F5	Goldstein-Price	3	[-2,2]	2
F6	Hartman 3	-3.86	[1,3]	3
F7	Hartman 6	-3.32	[0,1]	6
F8	Shekel 5	-10.1532	[0,10]	4
F9	Shekel 7	-10.4028	[0,10]	4
F10	Shekel 10	-10.5363	[0,10]	4

3.1.2 Engineering design problems

To verify the success of the developed method, besides the classical benchmark functions, three engineering design problems are used.

The most commonly used engineering design problems in the literature are the pressure vessel design problem, the welded beam design problem, and the tension/compression spring design. These problems were used in this study.

3.1.3 Pressure vessel design optimization problem

The main purpose of this problem is to determine the most suitable design parameters that will keep the total cost of a compressed cylindrical air tank to a minimum to create a given volume and a constant working pressure and meet the design constraints. As shown in Figure 4, the hood is hemispherical when both sides of the tank are closed [35].

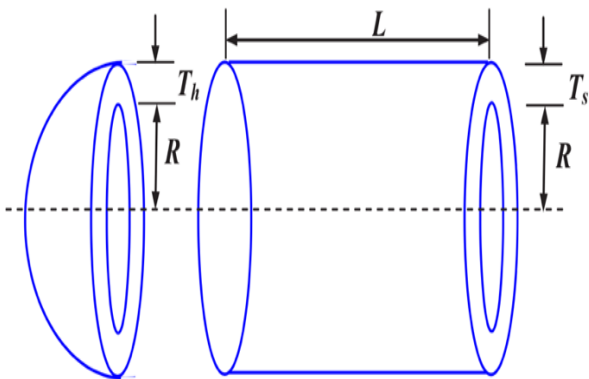


Figure 4. Schema of the pressure vessel design [23]

As shown in the figure, four design variables need to be optimized. The mathematical constraints of this problem are as in Equation (4).

$$\begin{aligned}
 \text{Variables } \vec{x} &= [x_1, x_2, x_3, x_4] = [T_s, T_h, R, L] \\
 &\text{the inner radius } (\mathbf{R}), \\
 &\text{the thickness of the cover } (\mathbf{T}_h), \\
 &\text{the shell thickness of the body } (\mathbf{T}_s), \\
 &\text{the length of the cylindrical part excluding the cover } (\mathbf{L}) \\
 \text{Objective Functions } f(\vec{x}) &= 0.6224x_1x_3x_4 + 0.7781x_2x_3^2 \\
 &\quad + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \\
 \text{Constraints } g_1(\vec{x}) &= -x_1 + 0.0193x_3 \leq 0, \\
 g_2(\vec{x}) &= -x_3 + 0.00954x_3 \leq 0, \\
 g_3(\vec{x}) &= -\pi x_3^2x_4 - \frac{4}{3}\pi x_3^3 + 1296000 \leq 0, \\
 g_4(\vec{x}) &= x_4 - 240 \leq 0, \\
 \text{Variable Ranges } &0 \leq x_1 \leq 99, 0 \leq x_2 \leq 99, \\
 &10 \leq x_3 \leq 200, 10 \leq x_4 \leq 200
 \end{aligned} \tag{4}$$

The objective function represents the manufacturing cost of the pressure vessel, and the smaller it is, the more efficient it is.

3.1.4 Welded beam design optimization problem

The main purpose of this problem is to find the optimum design so that the production of the welded beam is the least costly under the given constraints. As shown in Figure 5, the minimum production cost can be calculated by determining the optimum value of the four parameters [36].

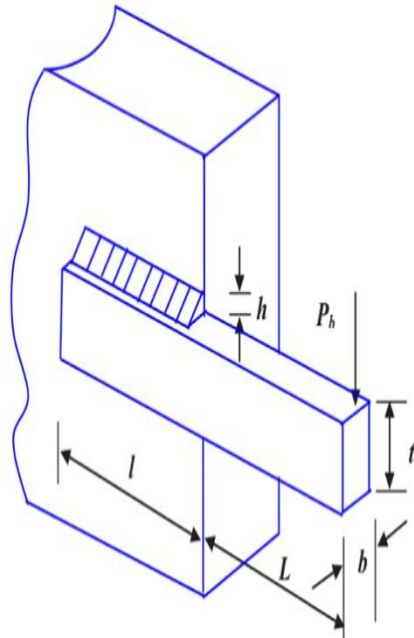


Figure 5. Schema of the welded beam design [23]

The given variables must be determined to satisfy the seven constraints. The mathematical expression of the welded beam problem is shown in Equation (5).

Variables $\vec{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [h, l, t, b]$
 the length of the connected part of the bar (**l**)
 the thickness of the weld (**h**)
 the height of the bar (**t**)
 the thickness of the bar (**b**)

Objective Functions $f(\vec{x})$
 $= 1.10471x_1^2x_2$
 $+ 0.04811x_3x_4(14.0 + x_2)$

Constraints $g_1(\vec{x}) = \tau(\vec{x}) - \tau_{max} \leq 0,$
 $g_2(\vec{x}) = \sigma(\vec{x}) - \sigma_{max} \leq 0$ (5)

$g_3(\vec{x}) = \delta(\vec{x}) - \delta_{max} \leq 0$

$g_4(\vec{x}) = x_1 - x_4 \leq 0,$

$g_5(\vec{x}) = P - P_c(\vec{x}) \leq 0,$

$g_6(\vec{x}) = 0.125 - x_1 \leq 0,$

$g_7(\vec{x}) = 1.10471x_1^2 + 0.04811x_3x_4(14.0 + x_2) - 5.0$
 $\leq 0,$

Variable Ranges $0.1 \leq x_1 \leq 2, 0.1 \leq x_2 \leq 10,$
 $0.1 \leq x_3 \leq 10, 0.1 \leq x_4 \leq 2$

3.1.5 Tension & compression spring design optimization problem

The main objective of this problem is to determine the three design parameters to establish the minimum weight of the tension spring to meet the specified design constraints [37]. An exemplary tension spring design is shown in Figure 6.

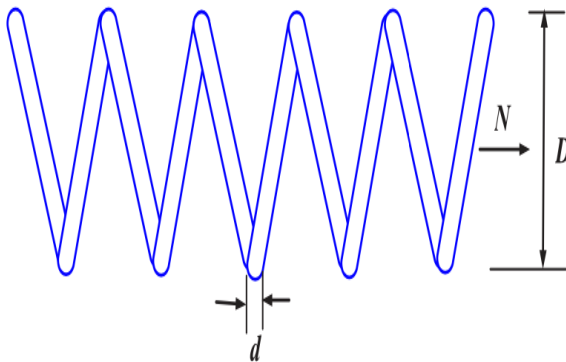


Figure 6. Schema of the compression spring design [23]

The mathematical expression of this problem is shown in Equation (6).

3.2 Experimental results

In this section, the performance of the advanced SSA algorithm is assessed by solving various optimization problems and comparing the results with popular algorithms from the literature under the same conditions. This section is divided into two parts. Firstly, the effectiveness of the proposed method is evaluated through ten fixed-dimensional optimization benchmark tests. In the second part, the

performance of the developed algorithm and the compared methods are analyzed in real-world design problems.

Variables $\vec{x} = [x_1, x_2, x_3] = [d, D, N]$
 the wire diameter (**d**),
 the average turn diameter (**D**)
 the number of active turns (**N**).

Objective Functions $f(\vec{x}) = (x_3 + 2)x_2x_1^2$

Constraints $g_1(\vec{x}) = 1 - \frac{x_2^3x_3}{71785x_1^4} \leq 0,$ (6)

$g_2(\vec{x}) = \frac{4x_2^2 - x_1x_2}{12566(x_2x_1^3 - x_1^4)} + \frac{1}{5108x_1^2} \leq 0,$

$g_3(\vec{x}) = 1 - \frac{140.45x_1}{x_2^2x_3} \leq 0$

$g_4(\vec{x}) = 1 - \frac{x_1 + x_2}{1.5} - 1 \leq 0,$

Variable Ranges $0.05 \leq x_1 \leq 2.00, 0.25 \leq x_2 \leq 1.30,$
 $2.00 \leq x_3 \leq 15.0,$

To verify the performance of the developed algorithm, five well-known algorithms, namely Grey Wolf Optimizer (GWO), Whale Optimization Algorithm (WOA), Moth-Flame Optimization (MFO), Moth-Flame Optimization (MFO), and Salp Swarm Algorithm (SSA), were used. The parameter values of the compared algorithms used in the experimental study are presented in Table 3. These parameter values correspond to the recommendations the respective algorithm authors provided in their own publications.

Table 3. Parameter values of the compared algorithms

Algorithms	Parameters	Values
GWO	alpha	2
WOA	alpha	2
MVO	wep _{max}	1
	wep _{min}	0.2
MFO	a (linearly decreases)	[-1, -2]
SSA (Original and Advanced)	Probability of crossover	0.8
	Probability of mutation	0.01

Thirty independent experiments were conducted to ensure a fair study, and the results were averaged. The number of populations used in each experiment was set to 40. A total of 50,000 fitness calculations were performed.

Table 4. Results of algorithms in benchmark test functions

No	Name	Evolution criteria	GWO	WOA	MVO	MFO	SSA	Advanced SSA
F1	Foxholes	mean	4.32E+00	2.34E+00	9.98E-01	1.85E+00	9.98E-01	9.98E-01
		std	4.35E+00	2.93E+00	1.31E-11	1.61E+00	2.39E-16	1.13E-16
F2	Kowalik	mean	2.35E-03	7.66E-04	5.91E-03	2.63E-03	8.71E-04	4.33E-04
		std	6.11E-03	4.21E-04	1.21E-02	5.01E-03	2.42E-04	1.09E-04
F3	Six Hump Camel	mean	-1.03E+00	-1.03E+00	-1.03E+00	-1.03E+00	-1.03E+00	-1.0316
		std	8.00E-09	2.15E-11	2.18E-07	6.78E-16	5.60E-15	5.68E-16
F4	Branin	mean	3.98E-01	3.98E-01	3.98E-01	3.97E-01	3.98E-01	3.98E-01
		std	2.51E-07	1.14E-06	5.25E-08	0.00E+00	5.21E-15	0.00E+00
F5	GoldStein-Price	mean	3.00E+00	3.00E+00	3.00E+00	3.00E+00	3.00E+00	3.00E+00
		std	6.11E-06	8.65E-06	9.88E-07	1.61E-15	1.08E-13	1.35E-15
F6	Hartman 3	mean	-3.00E-01	-3.00E-01	-3.00E-01	-3.00E-01	-3.00E-01	-3.34E+00
		std	2.26E-16	2.26E-16	2.26E-16	2.26E-16	2.26E-16	4.33E-01
F7	Hartman 6	mean	-3.24E+00	-3.26E+00	-3.27E+00	-3.22E+00	-3.22E+00	-3.32E+00
		std	7.87E-02	9.14E-02	6.04E-02	4.82E-02	4.22E-02	1.38E-08
F8	Shekel 5	mean	-8.97E+00	-9.73E+00	-7.96E+00	-5.98E+00	-7.82E+00	-1.02E+01
		std	2.18E+00	1.63E+00	2.80E+00	3.37E+00	3.41E+00	4.36E-10
F9	Shekel 7	mean	-1.00E+01	-8.72E+00	-8.38E+00	-7.93E+00	-8.42E+00	-1.04E+01
		std	1.34E+00	2.63E+00	2.73E+00	3.36E+00	3.15E+00	1.69E-10
F10	Shekel 10	mean	-1.02E+01	-7.72E+00	-9.10E+00	-8.58E+00	-7.96E+00	-7.05E+00
		std	1.58E+00	3.29E+00	2.42E+00	3.33E+00	3.51E+00	1.83E-09

3.2.1 Performance of advanced SSA in benchmark problems

The experimental study results for ten well-known benchmark functions conducted using five popular algorithms (GWO, WOA, MVO, MFO, original SSA, and advanced SSA) are presented in Table 4.

All benchmark test functions were executed in 30 dimensions

According to the results in Table 4, the advanced SSA algorithm demonstrated superior performance compared to the other algorithms, including the original SSA, in nine out of the ten benchmark test functions, indicating a success rate of 90%. These results highlight that by utilizing the Ikeda chaotic map, the proposed method achieves a favorable

balance between exploration and exploitation. Following the Advanced SSA, the MFO algorithm emerged as the second most successful.

3.2.2 Performance of advanced SSA in real-world engineering design optimization problems

In solving the engineering design optimization problems, the experimental work employed the same parameters as those used for the benchmark functions. Likewise, thirty independent runs were conducted and averaged. The maximum number of fitness evaluations (FEs) was 50,000, while the population was 40 individuals [38-41]. The results were compared with the performance of GWO, WOA, MVO, MFO algorithms, and the original SSA. The results of the experimental study are presented in Table 5.

Table 5. Results of algorithms in real-world engineering design optimization problems

No	Problem	Evolution criteria	GWO	WOA	MVO	MFO	SSA	Advanced SSA
P1	Welded Beam	mean	1.74E+00	2.33E+00	1.77E+00	1.72E+00	1.77E+00	-3.28E+05
		std	1.53E-02	4.57E-01	3.16E-02	8.34E-02	9.88E-02	2.45E+04
P2	Compression Spring	mean	3.67E+00	3.69E+00	3.71E+00	3.67E+00	3.68E+00	-9.73E+06
		std	2.63E-03	2.93E-02	3.28E-02	1.98E-02	2.08E-02	3.29E+06
P3	Pressure Vessel	mean	2.68E+03	4.32E+03	2.94E+03	2.39E+03	3.20E+03	-2.37E+11
		std	1.14E+03	1.81E+03	6.12E+02	3.35E+02	6.28E+02	3.44E+10

Based on the results presented in Table 5, it can be observed that the proposed method, advanced SSA, outperformed the compared methods in all engineering optimization problems. These findings confirm the superior performance and reliability of the proposed method.

4 Conclusion

The primary objective of this study was to enhance the balance between exploration and exploitation in the SSA algorithm by incorporating the Ikeda chaotic operator. The performance of the developed method was evaluated by applying it to ten different difficulty levels of fixed-dimension multimodal benchmark functions. To validate the results, a comparison was conducted with five well-known methods, namely GWO, WOA, MVO, MFO, and the original SSA. The experimental findings indicated that the proposed method outperformed these comparison methods regarding performance.

This study demonstrated that incorporating the Ikeda chaotic map into the r3 parameter of the SSA algorithm yielded efficient and reliable results. In future studies, it would be worthwhile to investigate the impact of different operators on the vital parameters of the SSA algorithm, namely r1 and r2. Exploring the performances of alternative operators concerning these parameters could provide valuable insights and further enhance the optimization capabilities of the SSA algorithm.

The results of the experimental study are quite competitive in terms of standard deviation values. The standard deviation values of all algorithms are very close to zero. It shows that these algorithms work stably, and their values are consistent across 30 independent studies.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19%

References

- [1] M. A. Şahman and S. Korkmaz, Discrete Artificial Algae Algorithm for solving Job-Shop Scheduling Problems. *Knowledge-Based Systems*, 256, 109711, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109711>.
- [2] A. C. Cinar, Training feed-forward multi-layer perceptron artificial neural networks with a tree-seed algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45 (12), 10915-10938, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04872-1>.
- [3] M. Gündüz, M. S. Kiran, and E. Özceylan, A hierarchic approach based on swarm intelligence to solve the traveling salesman problem. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23 (1), 103-117, 2015. <https://doi.org/10.3906/elk-1210-147>.
- [4] A. C. Cinar, S. Korkmaz, and M. S. Kiran, A discrete tree-seed algorithm for solving symmetric traveling salesman problem. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23 (4), 879-890, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.11.005>.
- [5] M. Kumar and J. S. Dhillon, Hybrid artificial algae algorithm for economic load dispatch. *Applied Soft Computing*, 71, 89-109, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.035>.
- [6] M. Beşkırlı, İ. Koç, H. Haklı, and H. Kodaz, A new optimization algorithm for solving wind turbine placement problem: Binary artificial algae algorithm. *Renewable Energy*, 121, 301-308, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.087>.
- [7] E. Kaya, BinGSO: galactic swarm optimization powered by binary artificial algae algorithm for solving uncapacitated facility location problems. *Neural Computing and Applications*, 1-20, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07058-y>.
- [8] S. Ozsari, H. Uguz, and H. Hakli, Implementation of meta-heuristic optimization algorithms for interview problem in land consolidation: A case study in Konya/Turkey. *Land Use Policy*, 108, 105511, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105511>.
- [9] A. C. Cinar and N. Natarajan, An artificial neural network optimized by grey wolf optimizer for prediction of hourly wind speed in Tamil Nadu, India. *Intelligent Systems with Applications*, 200138, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200138>.
- [10] B. Turkoglu and E. Kaya, Training multi-layer perceptron with artificial algae algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.07.001>.
- [11] B. Turkoglu, S. A. Uymaz, and E. Kaya, Clustering analysis through artificial algae algorithm. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 13 (4), 1179-1196, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108630>.
- [12] B. Turkoglu, S. A. Uymaz, and E. Kaya, Binary Artificial Algae Algorithm for feature selection. *Applied Soft Computing*, 120, 108630, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13042-022-01518-6>.
- [13] E. Kaya, S. Korkmaz, M. A. Sahman, and A. C. Cinar, DEBOHID: A differential evolution based oversampling approach for highly imbalanced datasets. *Expert Systems with Applications*, 169, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114482>.
- [14] S. A. Uymaz, G. Tezel, and E. Yel, Artificial algae algorithm (AAA) for nonlinear global optimization. *Applied Soft Computing*, 31, 153-171, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.003>.
- [15] M. A. Akbari, M. Zare, R. Azizpanah-Abarghoee, S. Mirjalili, and M. Deriche, The cheetah optimizer: A nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems. *Scientific reports*, 12 (1), 1-20, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14338-z>.
- [16] M. Jafari, E. Salajegheh, and J. Salajegheh, Elephant clan optimization: A nature-inspired metaheuristic algorithm for the optimal design of structures. *Applied Soft Computing*, 113, 107892, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107892>.
- [17] B. Abdollahzadeh, F. Soleimani Gharehchopogh, and S. Mirjalili, Artificial gorilla troops optimizer: a new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *International Journal of*

- Intelligent Systems, 36 (10), 5887-5958, 2021. <https://doi.org/10.1002/int.22535>.
- [18] F. A. Hashim and A. G. Hussien, Snake Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm. Knowledge-Based Systems, 242, 108320, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2022.108320>.
- [19] B. Abdollahzadeh, F. S. Gharehchopogh, and S. Mirjalili, African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. Computers & Industrial Engineering, 158, 107408, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107408>.
- [20] H. Jia, X. Peng, and C. Lang, Remora optimization algorithm. Expert Systems with Applications, 185, 115665, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115665>.
- [21] W. Zhao, L. Wang, and S. Mirjalili, Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 388, 114194, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114194>.
- [22] M. Braik, A. Hammouri, J. Atwan, M. A. Al-Betar, and M. A. Awadallah, White Shark Optimizer: A novel bio-inspired meta-heuristic algorithm for global optimization problems. Knowledge-Based Systems, 243, 108457, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2022.108457>.
- [23] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, and A. H. Gandomi, Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. Expert Systems with Applications, 152, 113377, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377>.
- [24] Y. Jiang, Q. Wu, S. Zhu, and L. Zhang, Orca predation algorithm: A novel bio-inspired algorithm for global optimization problems. Expert Systems with Applications, 188, 116026, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116026>.
- [25] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and S. M. Mirjalili, Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems. Advances in Engineering Software, 114, 163-191, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.07.002>.
- [26] D. H. Wolpert and W. G. Macready, No free lunch theorems for optimization. IEEE transactions on evolutionary computation, 1 (1), 67-82, 1997. <https://doi.org/10.1109/4235.585893>.
- [27] Y.-C. Ho and D. L. Pepyne, Simple explanation of the no-free-lunch theorem and its implications. Journal of optimization theory and applications, 115 (3), 549-570, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1021251113462>.
- [28] H. Bingol and M. Yildirim, Global Optimizasyon İçin Sürü Tabanlı Bir Yaklaşım Salp Sürü Algoritması. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 33 (1), 51-59, 2021.
- [29] M. Castelli, L. Manzoni, L. Mariot, M. S. Nobile, and A. Tangherloni, Salp Swarm Optimization: A critical review. Expert Systems with Applications, 189, 116029, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116029>.
- [30] Y. Şekertekin and Ö. Atan, An image encryption algorithm using Ikeda and Henon chaotic maps. 24th Telecommunications Forum (TELFOR), 1-4, 2016.
- [31] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, Grey wolf optimizer. Advances in engineering software, 69, 46-61, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- [32] S. Mirjalili and A. Lewis, The whale optimization algorithm. Advances in engineering software, 95, 51-67, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>.
- [33] L. Abualigah, A. Diabat, S. Mirjalili, M. Abd Elaziz, and A. H. Gandomi, The arithmetic optimization algorithm. Computer methods in applied mechanics and engineering, 376, 113609, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>.
- [34] N. Panagant, N. Pholdee, S. Bureerat, K. Kaen, A. R. Yıldız, and S. M. Sait, Seagull optimization algorithm for solving real-world design optimization problems. Materials Testing, 62(6), pp. 640-644, 2020. <https://doi.org/10.3139/120.111529>.
- [35] S. Hassan, K. Kumar, C. D. Raj, and K. Sridhar, Design and optimisation of pressure vessel using metaheuristic approach. Applied Mechanics and Materials, 465,401-406, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.401>.
- [36] A. T. Kamil, H. M. Saleh, and I. H. Abd-Alla, A Multi-Swarm Structure for Particle Swarm Optimization: Solving the Welded Beam Design Problem. Journal of Physics: Conference Series, 1804 (1), 2021.
- [37] Y. Çelik and H. Kutucu, Solving the Tension/Compression Spring Design Problem by an Improved Firefly Algorithm. IDDM, 1 (2255), 1-7, 2018.
- [38] G. Kaur and S. Arora, Chaotic whale optimization algorithm. Journal of Computational Design and Engineering, 5 (3), 275-284, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.12.006>.
- [39] M. Kohli and S. Arora, Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems. Journal of computational design and engineering, 5 (4), 458-472, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.02.005>.
- [40] A. H. Gandomi, X.-S. Yang, S. Talatahari, and A. H. Alavi, Firefly algorithm with chaos. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 18 (1), 89-98, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2012.06.009>.
- [41] G. I. Sayed, G. Khoriba, and M. H. Haggag, A novel chaotic salp swarm algorithm for global optimization and feature selection. Appl Intell, 48 (10), 3462-3481, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1158-6>.





Vaporizing foil actuator welding prototype manufacturing and applications risk analysis

Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı prototip imalatı ve uygulamaları risk analizi

Ganime Tuğba Önder ^{1,*} , Mustafa Kemal Külekci ² 

¹Çukurova University, Adana Vocational School, Department of Electricity and Energy, Air Conditioning and Refrigeration Technology Program, 01160, Adana, Türkiye

²Tarsus University, Department of Mechanical Engineering, Faculty Engineering, 33400, Mersin, Türkiye

Abstract

This study was conducted to examine risk levels for Vaporizing Foil Actuator Welding (VFAW) prototype manufacturing and applications. A risk analysis was carried out by using the L-type matrix method to detect hazards and risks in newly developing VFAW applications. 60 risks were identified for VFAW, 37 of which were high and 23 were moderate. To reduce the risk and occupational accidents to the lowest possible level; a measuring instrument that can continuously monitor current and voltage values, a remote detonation system and a discharge mechanism have been added to the prototype system. Thanks to the measures taken the situations that may result in serious accidents, fire, explosion, loss of limb, and even death that may occur during the experiment have been brought under control and VFAW applications have been made safer.

Keywords: Occupational safety and health, Vaporizing Foil Actuator Welding, Risk Assessment, L-Type Matrix

1 Introduction

Many studies and applications are carried out to ensure the continuity of manufacturing processes and to meet the needs of the industry [1-4]. Increasing needs and technological developments necessitate different manufacturing techniques [5, 6]. Employees are faced with many health and safety problems during manufacturing processes [7-9], and the issue of occupational health and safety is gaining more importance every day [10-14]. When the occupational accidents in the welding sector and related business lines are examined; It is observed that occupational accidents occur at a rate of 44% as a result of not using personal protective equipment, 37% due to lack of attention, and 17% due to equipment that does not take adequate safety precautions [9, 15-17].

The lack of education and knowledge of the employees in the occupational fields and the poor analysis of the working conditions constitute the basis for occupational accidents. Occupational safety analysis is a safety tool that can be used to identify and control hazards associated with a

Öz

Bu çalışma, Buharlaştırılmış Folyo Aktüatör Kaynağı (VFAW) prototip üretimi ve uygulamaları için risk düzeylerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yeni geliştirilen VFAW uygulamalarında tehlike ve risklerin tespiti için L tipi matris yöntemi kullanılarak risk analizi yapılmıştır. VFAW için 37'si yüksek ve 23'ü orta olmak üzere 60 risk belirlendi. Riski ve iş kazalarını mümkün olan en düşük seviyeye indirmek için; prototip sisteme akım ve gerilim değerlerini sürekli takip edebilen ölçü aleti, uzaktan patlatma sistemi ve deşarj mekanizması eklenmiştir. Alınan önlemler sayesinde deney sırasında oluşabilecek ciddi kaza, yangın, patlama, uzuv kaybı ve hatta ölümlerle sonuçlanabilecek durumlar kontrol altına alınmış ve VFAW uygulamaları daha güvenli hale getirilmiştir.

Anahtar kelimeler: İş güvenliği ve sağlığı, Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı, Risk değerlendirmesi, L-Tipi Matris

particular process, job, or procedure [18]. Risk assessment analyses are of great importance in areas where applications such as workshops and laboratories are carried out. Workshops and laboratories have serious hazards due to their working environments and many risks arising from these hazards. Specific studies should be conducted to identify the existing risks and levels for these areas [19-22]. In order to protect against the dangers and risks in the working environment, hazards should be determined, the risks should be analyzed systematically and necessary precautions should be taken in a timely manner [23-26]. In this way, occupational safety conditions will be provided and a healthy working environment will be achieved.

Vaporizing foil actuator welding (VFAW), based on electric explosion [27] and shock wave [28] of conductors, was first used for welding by Vivek et al. [29]. VFAW is a new and promising type of pulse welding for the increasing demand for alternative joining methods [29-31]. It belongs to the solid state welding group and uses a high pressure pulse produced by vaporizing an aluminum foil [32-34]. It is an ideal technique for welding materials that are difficult to

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gercoskun@cu.edu.tr (G. T Önder)

Geliş / Received: 24.01.2023 Kabul / Accepted: 28.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1241634

weld with each other using conventional methods, as they have different mechanical and thermal (e.g. melting point) properties such as Fe, Al, Cu, Ni and Ti [35-38]. It creates a pulse and creates a high-speed production technology by enabling the rapid evaporation of thin conductors with electricity. It has various applications such as forming, cutting, embossing, collision welding, powder compression, and spring-back calibration [39, 40].

In this welding process; By using the impact effect of electrical discharge, metal materials are superiorly joined between welding fixtures by means of the supporting steel blocks and the standoff sheet that separates the welding materials. Figure 1 shows the general application scheme of the VFAW process [29, 41, 42].

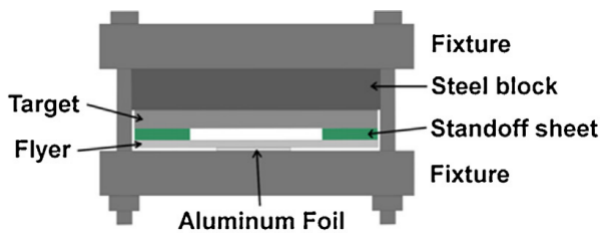


Figure 1. Scheme of the vaporizing foil welding apparatus [29].

This study is for VFAW, which is newly developed and in search of industrial applications in the industrial market; During the implementation, it was carried out in order to identify possible risks that may occur in terms of work and employees, and to make preventive suggestions to solve these risks. During the study, a prototype machine was developed and manufactured and all experiments were carried out on this machine to produce welded joints with VFAW.

The prototype produced allows studies on the welding process and parameters of different materials. In addition, the study has enabled the practical determination of the potential hazards that may occur during the "Vaporizing Foil Actuator Welding Prototype Device and Applications" activities and the risks that may arise as a result of these. The step-by-step manufacturing and application studies for welding methods provide a systematic description of the methods and principles regarding the control of expected or potential risks. The ultimate goal is to reduce VFAW-specific, high-probability work accidents, occupational diseases, and environmental damage to acceptable levels. This study is also considered to be a guide in the applications and experimental studies during the production of welding equipment.

2 Material and method

In this study, the L-type matrix method was used, and each of the listed hazards was evaluated separately by using the hazard/risk assessment form for each defined activity area. The L-type matrix method is generally used in the evaluation of cause-effect relationships; It is used to analyze the relationship between two or more variables or to determine (scoring) the degree of risk and the effect of risk. This method is a computable and quantitative risk

assessment method as well as being fast and easy to implement [36, 43, 44]. The flow chart followed for the hazard identification and risk assessment program consists of the steps in Figure 2 [30].

While calculating the risk value of each of the identified hazards, the probability and impact (severity) of the hazard are classified and scored. The risk value is calculated from the combination of probability and effect. Hazard classification is determined by examining the risk value of the hazard and whether there is a sanction related to the consequences of the risk, and a priority rating (score) is given to each identified risk [30].

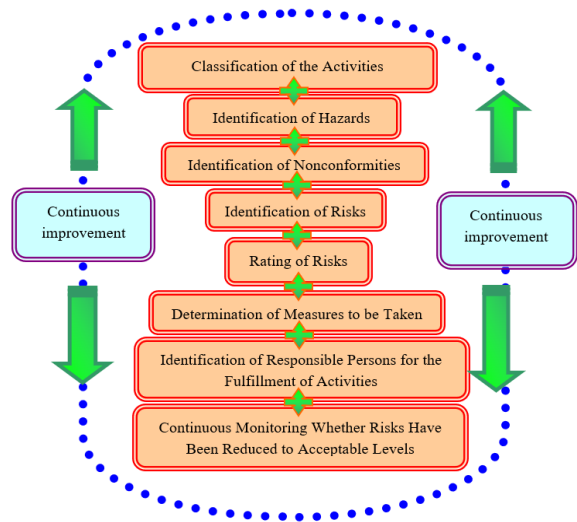


Figure 2. Hazard identification and risk assessment program flow chart [30].

While performing the VFAW risk assessment, the hazards and risks related to both health and safety were handled one by one. Examples: noise, combustion, explosion, etc. For each classification and situation, the score was determined according to the frequency of occurrence of the risk defined by the L-type matrix probability score sheet in Table 1. In line with the L-type matrix effect (intensity) table given in Table 2; The severity of the scenario that may occur in case of the realization of the defined risk is scored. These values are written in the probability and severity columns of the table given in Appendix A Table A1. The risk value was calculated with the formula given in Equation 1, and the risk scores were determined by using the L-type decision matrix given in Table 3. This risk score is written in the current score section of the table given in Appendix A Table A1. With the measures taken, a new risk score was obtained by reducing the probability and severity values, and this score was recorded in the target score column in Table A1 of Appendix A.

$$\text{Risk} = \text{Impact (Severity)} \times \text{Probability} \quad (1)$$

Table 1. L-Type matrix probability score table [30]

Probability	Frequency
5: Very High	Every day
4:High	Once a week
3: Medium	Once every three months
2: Low	Once a year
1:Very Low	Every five years or more

Table 2. L-Type matrix effect (intensity) table [30]

Value	Ratings
5: Catastrophic	Death
4: Major	Serious Injury, Limb Loss, Occupational Disease, Permanent Incapacity for Work
3: Moderate	Injuries requiring treatment, Inpatient Treatment, Short Term Incapacity for Work Situations that may require first aid,
2: Minor	Outpatient treatment, Loss of workforce during the day
1: Insignificant	No job loss, no need for first aid

For the scoring to be objective, it was prepared by taking the opinions of the occupational safety experts of the joint health and safety unit and the risk assessment team members, the coordinating officer of the risk assessment studies, as well as the opinions of those present in the experiment area.

After taking the average of the scoring results, the final scores are determined as whole numbers; By multiplying the final scores, a basis was established for an objective evaluation of the priority level. Here the scoring was done by different people. The data obtained were reviewed by the risk assessment team and the coordinator of risk assessment studies, and the final priority level was determined [30].

According to the priority level determined and the resources that the study owners can allocate, the evaluation of the priority among the hazards was decided in line with the method given in Table 4. It is continuously checked and investigated whether the planned activities are realized or not. The risk assessment was made according to the risks discovered during the manufacturing activities and VFAW experiments in the workshop while the VFAW prototype was being manufactured.

Table 3. L-Type decision matrix [30]

Risk Score = Possibility x Severity	Severity				
PROBABİLİTY	1- Very Low	2- Low	3- Moderate	4- Severe	5- Critical
1 - Very Low	Negligible 1	Low 2	Low 3	Low 4	Low 5
2- Low	Low 2	Low 4	Low 6	Medium 8	Medium 10
3- Medium	Low 3	Low 6	Medium 9	Medium 12	High 15
4- High	Low 4	Medium 8	Medium 12	High 16	High 20
5- Very High	Low 5	Medium 10	High 15	High 20	Unacceptable 25

Table 4. Result and action table [30]

Conclusion	Action	Importance level
Unacceptable Risks (25)	Work should not be started until the identified risk is reduced to an acceptable level, if there is an ongoing activity, it should be stopped immediately. If it is not possible to reduce the risk despite the actions taken, the activity should be blocked.	1
Significant Risks (15,16,20)	Work should not be started until the identified risk is reduced, if there is an ongoing activity, it should be stopped immediately. If the risk is related to the continuation of the work, urgent action should be taken and as a result of these measures, the continuation of the activity should be decided.	2
Moderate Risks (8,9,10,12)	Actions should be initiated to reduce the identified risks. Risk reduction measures can take time.	3
Acceptable Risks (2,3,4,5,6)	Additional control processes may not be needed to eliminate identified risks. However, existing controls should be maintained and it should be audited that these controls are maintained.	4
Insignificant Risks (1)	It may not be necessary to plan control processes and keep records of activities to be performed to eliminate identified risks.	5

Considering the date of the study, it was found appropriate to make revisions for VFAW prototype manufacturing and applications, if necessary, based on the risks that could not be seen or discovered, and the risks that occurred or may occur later. Additions to the system used for this study and modification of the test site should take this into account as the conditions for the risks listed will be changed.

3 Results and Discussion

The hazards and risk assessments identified for the Vaporizing Foil Actuator Welding prototype manufacturing and applications in the study performed are presented in Appendix A [Table A1](#). While the prototype is being manufactured, there are different manufacturing needs and studies in the workshop and in the experiment area. The risks listed in this study are based on the site of the experiment and the school fabrication workshop. Hazards are not listed here for cases where manufacturing support is received from industries and businesses for prototype manufacture.

The created hazards were graded using the matrix method, and suggestions were made for the precautions to be taken. For the measures determined at significant risks, the expiry date is 10-15 days after the first analysis; for medium-level risks, it was created and checked after 30 days. In order to ensure that the experimenters and the test place are suitable for safe operation, the test studies continued after the controls specified here.

With this risk analysis study, 9 for fire, pharmacy, emergency departments with a high probability of occurrence for newly developing VFAW, 9 for personal protective equipment materials, warning-warning and ergonomic sections, 12 for mechanical operations with the use of hand tools and compressors, and 60 risks were identified, 30 for the electrical departments.

The grading results of these risks are 37 high risk and 23 moderate risks numerically. For each risk situation, the risk score was determined by means of the tables and it was seen that the average risk score was 14. According to the method specified in [Table 3](#), this figure reveals that VFAW and its studies are high-risk studies. Due to the high risk of the work required for the prototype and welding produced for VFAW, it should be developed under constant control and supervision. In addition to manufacturing works that are described as mechanical, welding apparatus and tests must be operated with electrical support and precautions.

4 Conclusions and suggestions

One of the situations that is always neglected while producing prototypes is the work that needs to be carried out on occupational health and safety issues. The risk analysis application acts as a warning and mostly preventive for dangerous situations that may occur, accidents and even situations that may result in death. The realization of the planning in the process in harmony with the legislation will ensure the acquisition of the right road map. This study was conducted to examine the risk levels for "Vaporizing Foil Actuator Welding prototype fabrication and applications". In the study, hazards and risks for newly developing VFAW

applications were determined and risk analysis study was carried out with the L-type matrix method.

In order to reduce the identified risks to an acceptable level, based on the Occupational Health and Safety Law published in the Official Gazette dated 30.06.2012 and numbered 28339 of the Law No. 6331, in accordance with the Occupational Health and Safety Risk Assessment Regulation dated 29.12.2012 and numbered 28512, sustainable, effective control and measures have been determined.

As a result; 60 risks, 37 high risk and 23 medium risks, were determined in the workshop and field where this study was carried out. A risk score was determined for each risk, and the mean risk score for the study was 14. VFAW and its applications were found to be high risk. These identified high risks should be managed and kept under surveillance. Thanks to the measures taken, risk management activities were determined. The hazard and risk assessment results, which were created according to the identified risks, are presented graphically in [Figure 3](#). Here, it is seen that the current risk scores for VFAW have been reduced by the measures taken.

Current risk scores for VFAW; While the impact severity and probability scale were created using the L-type decision matrix, the target scores were created using the result and action table. A separate risk score was determined for each of the 60 risks. Thanks to the measures taken, sustainable and effective controls and measures were determined in accordance with the Occupational Health and Safety Risk Assessment Regulation, and target scores were achieved.

In [Figure 4](#), mechanical additions made to the prototype produced as a result of the risk analysis study are presented. An explosion button used for the remote explosion system, a control valve associated with the control of this button, a separate storage area for the compressor, and a second pneumatic switch for correct grounding have been added to the existing prototype system. These deficiencies, which protect the employees and the environment, were noticed and implemented through the risk analysis study.

Reducing the sources of high risk to an acceptable level in high-risk VFAW and applications will be ensured by the full implementation of the measures determined as a result of the analysis. In this regard, employees should show the necessary importance both at the production stage and at the place where the test is carried out. Before and after starting work, periodic trainings should be given about VFAW work and its risks. For the work to always remain in safe conditions, continuity should be ensured by the occupational safety specialist. Among the existing risks are serious risks of electric shock, explosion and burning to the experimenters.

For these risks, the following suggestions were made in general, aiming to eliminate the deficiencies in the measures taken in current situations, to correct the application errors and to provide a safe experimental environment;

- Personal protective equipment materials suitable for the work should be provided and used,
- An emergency plan should be created for emergencies,

- The numbers to be called in case of emergency should be hung in a visible place in the test area in the size and position in accordance with the safety and health signs regulation,
- At least one employee should receive first aid training,
- There should be 6kg dry chemical powder fire extinguishers in the work area against fire, they should be located within the test area, at easily accessible points,
- Measurement indicators, where current and voltage values can be observed continuously, should be added to the welding set up,
- In the welding prototype, a remotely controllable pneumatic switch should be added to the system in order to ensure safe discharge while electrical discharge is being made and to prevent damage to the person and the physical environment in and around the experiment area.
- New tests should not be carried out before safe conditions are established,
- Occupational safety specialists should continue training and inspection with continuous controls,
- Risk assessment team members should periodically train everyone working on the fabrication and testing site to maintain due attention to work-specific risks.

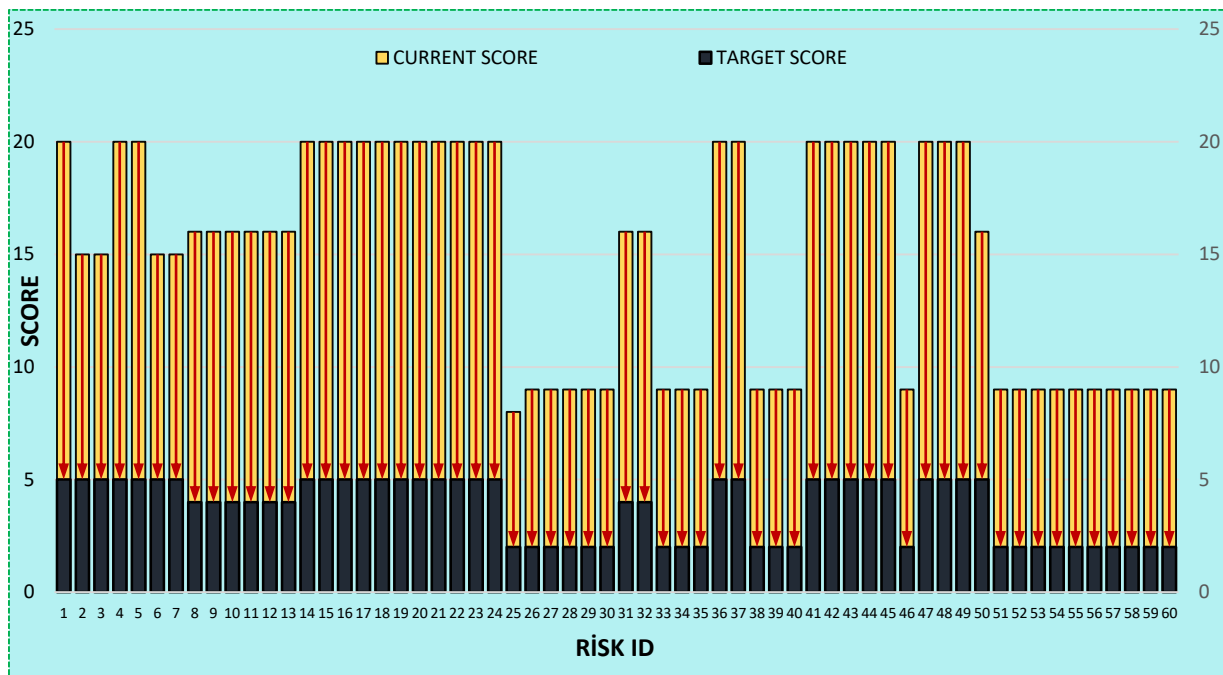


Figure 3. Hazard and risk assessment result graph

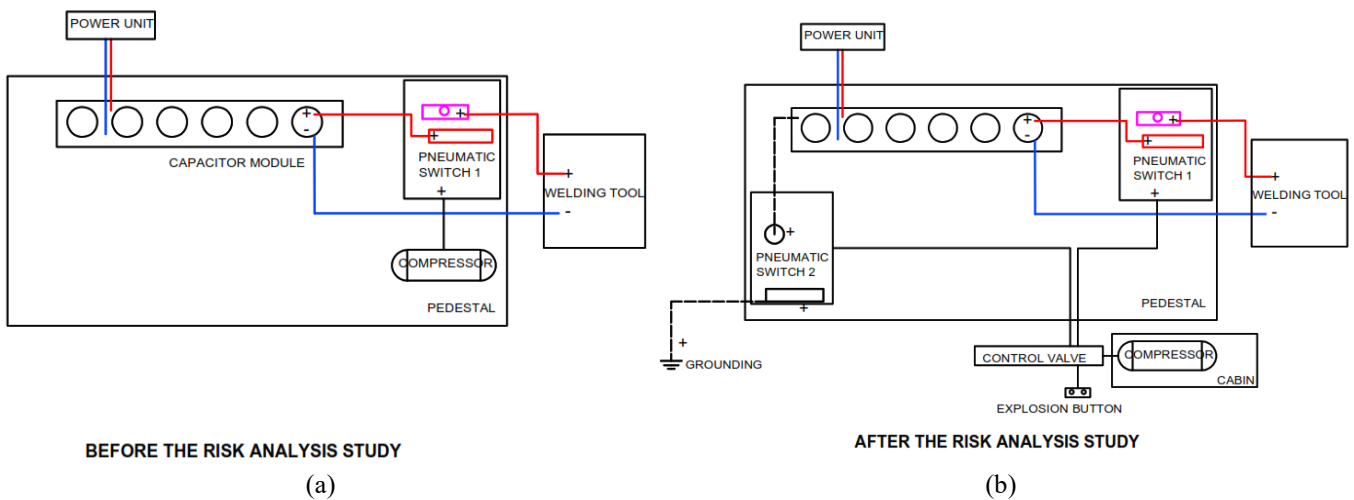


Figure 4. Mechanical attachments to the vaporizing foil actuator welding by risk analysis study

Acknowledgement

This study was supported by TÜBİTAK within the scope of the project numbered 222M455 within the scope of "1002-A Rapid Support Module" and within the scope of the INSTITU.21.001 report of the Tarsus University Scientific Research Projects (BAP) Coordination Unit.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 7%

References

- [1] K. Horozoğlu, İş kazalarının iş sağlığı ve güvenliği açısından analizi, Karabük University Journal of Institute of Social Sciences, 8(2), 265-281, 2019.
- [2] R. Malomane, I. Musonda, C. S. Okoro, The opportunities and challenges associated with the implementation of fourth industrial revolution technologies to manage health and safety, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(2),846, 2022. doi:10.3390/ijerph19020846
- [3] R. İ. Dosun, Çelik konstrüksiyon imalatı yapan bir iş yerinde iş sağlığı ve güvenliği ve risk analizi çalışması, Master Thesis, Institute of Health Sciences, Istanbul Yeni Yüzyıl University, Istanbul, 2018.
- [4] N. Panchanatham, V. Jayalakshmi, A study on employee safety and workplace hazards in relation to performance of jewellery manufacturing industries, Journal of Contemporary Research in Management, 11(3), 1, 2016.
- [5] Z. Aziz, Bir metal işleme işletmesinde iş güvenliği ve risk analizi, Master Thesis, Institute of Science and Technology, Çanakkale Onsekiz Mart University, 2019.
- [6] S. Alçın, Üretim İçin Yeni Bir İzlek: Sanayi 4.0., Journal of life Economics, 3(2), 19-30, 2016.
- [7] E. Ünal, İmalat sektöründe iş güvenliği ve risk analizi, Master Thesis, Trakya University, Institute of Science and Technology, 2014.
- [8] M. Erdaş, Metal imalat sektörü iş sağlığı ve güvenliği risklerinin değerlendirilmesi, Ph.D. Thesis, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Institute of Science and Technology, 2020.
- [9] T. Teker, D. Gençdoğan, Türkiye’de kaynakçılık mesleğinde meydana gelen iş kazaları ve güvenlik önlemleri, Journal of Engineering Sciences of Adiyaman University, 7(12), 34-44, 2020.
- [10] G. Serin, M. Çuhadar, İş güvenliği ve sağlığı yönetim sistemi, Journal of Technical Sciences, 5(2), 44-59, 2015.
- [11] M. K. Harris, Welding health and safety: a field guide for oehs professionals, Welding Health and Safety: A Field Guide for OEHS Professionals, AIHA, Virginia, 2002.
- [12] F. Golbabaie, M. Khadem, Air pollution in welding processes—assessment and control methods, Current Air Quality Issues, 33-63, 2015. doi:10.5772/59793.
- [13] D. A. Lombardi et al., 2005. Welding Related Occupational Eye Injuries: A Narrative Analysis, Injury Prevention, 11(3), 174-179. doi:10.1136/ip.2004.007088
- [14] V. P. Sudhashree et al., New technologies, new hazards: need for evidence base: a report on the health status and safety measures in a biotechnology factory in bangalore, Indian Journal of Community Medicine, 32(3), 178, 2007.
- [15] S. Karamik, U.Seker, İşletmelerde, İş güvenliğinin verimlilik üzerine etkilerinin değerlendirilmesi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 3(4), 575-584, 2015.
- [16] A. Turan, Kaynak işlerinde iş güvenliği, Welding Congress IX. National Congress and Exhibition Proceedings, Engineer and Machinery, 57, 673, 411-422, 2015.
- [17] B. Gulhan, M. Ilhan, E. Civil, Occupational accidents and affecting factors of metal industry in a factory in Ankara, Turkish Journal of Public Health, 10(2), 76-85, 2012.10.20518/tjph.173067.https://doi.org/10.20518/tjph.173067
- [18] K. Misiurek, B. Misiurek, Methodology of improving occupational safety in the construction industry on the basis of the twi program, Safety science, 92, 225-231, 2017. 10.1016/j.ssci.2016.10.017
- [19] D.Ç. Taşdemir, Risk değerlendirme metodolojileri: belirlenen nitel yöntemler, Uluslararası Sosyal ve Beşeri Bilimler Kongresi Kongre Kitabı, 60-65, 2021.
- [20] M.B. Wanjari, P. Wankhede, Occupational hazards associated with welding work that influence health status of welders, International Journal of Current Research and Review, 12(23), 51-55, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.31782/IJCRR.2020.122303
- [21] N. A. Shuaib et al., Assessing risks and control measures on a welding workshop in Malaysia, In AIP Conference Proceedings, Vol. 2339, No. 1, p. 020218). AIP Publishing LLC, 2021. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0044249
- [22] Y.O. Tagurum et al., Awareness of occupational hazards and utilization of PPE amongst welders in jos metropolis, Nigeria, International Journal of Research in Medical Sciences, 6(7), 2227-2233, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.18203/2320-6012.ijrms20182808
- [23] S. Ersoy, E. Ç. Kaya, Bir kamu üniversitesi gıda mühendisliği laboratuvarları risk analiz uygulaması, Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 8(4), 411-423, 2019.
- [24] D. Celayir, İç denetim ve risk değerlendirme, Yalın yayıncılık, Editör Hatice Bahtiyar, İstanbul, 2021.
- [25] G. Caner Akın et al., Yeni bir risk değerlendirme yöntemi ile tersane işletmelerinin sınıflandırılması, Business & Management Studies: An International Journal, 8 (1), pp. 2372-2384, 2020. doi: http://dx.doi.org/10.15295/bmij.v8i1.1349
- [26] S. Selçuk, H. H. Selim, Mücevherat sektöründe kullanılan iş sağlığı ve güvenliği risk analiz yöntemlerinden I tipi matris yöntemi, İstanbul Ticaret

- Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 1(1), 21-27, 2018.
- [27] G.C. William and M.A. Levine. Classification of wire explosions. *Journal of applied physics* 31.7 (1960): 1298-1298. <https://doi.org/10.1063/1.1735823>
- [28] R.C. Weingart, et al. Acceleration of thin flyers by exploding metal foils: application to initiation studies.[PETN, TATB, PBX-7404, NM]. No. UCRL-77610; CONF-760805-10. California Univ., Livermore (USA). Lawrence Livermore Lab., 1976.
- [29] A. Vivek et al., Vaporizing foil actuator: a tool for collision welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2304-2311, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.07.006>
- [30] M.E. Önder, Servet common health and safety unit, hazard and risk assessment procedure, Adana. 'Personal communication', 2022.
- [31] F. Salguero-Caparrós et al., Management of legal compliance in occupational health and safety. a literature review, *Safety Science*, 121, 111-118,2020. [doi :10.1016/j.ssci.2019.08.033](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.033)
- [32] A. Vivek et al., Accessing collision welding process window for titanium/copper welds with vaporizing foil actuators and grooved targets, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8), 1583-1589, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.007>
- [33] A. Vivek et al., Solid state impact welding of bmg and copper by vaporizing foil actuator welding, *Materials Science and Engineering: A*, 634, 14-19, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.012>
- [34] S. R. Hansen, A. Vivek, G. S. Daehn, Impact welding of aluminum alloys 6061 and 5052 by vaporizing foil actuators: heat-affected zone size and peel strength, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(5), 2015. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4030934>
- [35] M. Hahn et al., Vaporizing foil actuator welding as a competing technology to magnetic pulse welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 8-20, 2016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.010>
- [36] D. Pereira et al., Magnetic pulse welding: machine optimisation for aluminium tubular joints production. *Science and Technology of Welding and Joining*, 23.2 (2018):172-179. doi:<https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1355425>
- [37] M. Watanabe, et al. Interfacial microstructure of aluminum/metallic glass lap joints fabricated by magnetic pulse welding. *Mater Trans.* 2009;50(6):1279–1285. doi:<https://doi.org/10.2320/matertrans.ME200835>
- [38] Y. Lu et al., Dissimilar metal joining of aluminium to zinc-coated steel by ultrasonic plus resistance spot welding–microstructure and mechanical properties. *Science and Technology of Welding and Joining* 25.3 (2020): 218-227. doi: <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1667051>
- [39] K. Sajun Prasad, et al. Recent Developments of Vaporizing Foil Actuator Technique for Manufacturing Applications. In: *Forming the Future: Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity*. Springer International Publishing, 2021. p. 1341-1350.
- [40] A. Vivek, and G. S. Daehn. Vaporizing foil actuator: a versatile tool for high energy-rate metal working. *Procedia Engineering* 81 (2014): 2129-2134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.297>
- [41] B., Liu, A. Vivek, G.S. Daehn, Joining sheet aluminum AA6061-T4 to cast magnesium AM60B by vaporizing foil actuator welding: input energy, interface, and strength, *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 75-82, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.09.008>
- [42] S. Chen et al., Interfacial characteristics of Ti/Al joint by vaporizing foil actuator welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 73-81, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.004>
- [43] Z. Meng et al., Joining performance and microstructure of the 2024/7075 aluminium alloys welded joints by vaporizing foil actuator welding, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 34(2), 368-372, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11595-019-2061-7>
- [44] Department of Defence (DoD), Standard Practice for System Safety, MILSTD-882D, 2000.



APPENDICES

Appendix A Table A1

HAZARD AND RISK ASSESSMENT FORM																					
"VAPORISING FOIL ACTUATOR WELDING PROTOTYPE MANUFACTURING AND APPLICATIONS" RISK ANALYSIS																					
RISK ASSESSMENT TEAM		HAZARD CLASS: VERY DANGEROUS		DATE MADE		18.07.2022															
THESIS ADVISOR		PROF.DR.MUSTAFA KEMAL KÜLEKÇİ																			
JOB SECURITY SPECIALIST		MEHMET ERGİN ÖNDER																			
WORKPLACE DOCTOR		DR.SERDAR TAŞCI																			
EMPLOYEE REPRESENTATIVE		LECTURER GANİME TUĞBA ÖNDER																			
SUPPORT PERSONNEL		ORÇUN KÜÇÜKATAY																			
RISK ID	DEPARTMENT	ACTIVITY	HAZARD LIST	RISK DESCRIPTION	CURRENT MEASURE	AFFECTED PEOPLE	CURRENT SCORE			TARGET SCORE			FINAL SCORE		END SITUATION						
							Probability	Severity	Risk Score	Priority Degree	Planned Action Evaluation Mitigation Description	RESPONSIBLE	DATE	Probability		Severity	Risk Score	Finish Date	Probability	Severity	Risk Score
1	FIRE	FIRE	Inability to respond to fire	Combustion, burns, material damage in the workplace	Fire extinguisher tube was provided to be used in the experiment area.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Appropriate type, size and number of fire extinguishing devices will be provided for each partitioned area.	Employer/ Employer's Attorney		1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
2	FIRE	FIRE	The absence of fire fighting equipment in conditions suitable for use in the test room	Combustion, burns, material damage in the workplace	Since the fire extinguishers are mobile, they are in the open and easily accessible places.	Persons in the experimental area	3	5	15	2	1. Fire extinguishers will be placed at a maximum height of 90 cm from the ground in such a way that they can be easily taken. 2. The location will be indicated with signboards in accordance with the fire extinguisher safety and health signs regulation.	Employer/ Employer's Attorney		1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
3	FIRE	FIRE	Lack of education	Combustion, burns, material damage in the workplace	Employees have fire training.	Persons in the experimental area	3	5	15	2	1. Training will be provided on the use of fire extinguisher tubes. 2. Employees will be informed about fire extinguishing procedures. 3. Instructions to use fire extinguishers will be placed on them.	Employer/ Employer's Attorney		1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
4	FIRE	GENERAL	Firefighting equipment not working	Combustion, burns, material damage in the workplace	The expiration dates are checked and the expired ones are changed.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Periodic control of fire extinguishers once in 6 months, periodic control of pressure vessels every 5 years will be made by the manufacturer and the documents will be kept.	Employer/ Employer's Attorney		1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
5	FIRE	GENERAL	Insufficient fire extinguishers	Late response to fire, increased damage, burning	There is one fire extinguisher.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Sufficient number of fire extinguishers will be taken 2. Fire tubes will be 90 cm above the ground 3. Fire tubes will be replaced every 6 months	Employer/ Employer's Attorney		1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
6	EMERGENCY	GENERAL	Lack of a list of numbers to call in an emergency	Increasing severity of possible problem	It was hung in visible places.	Persons in the experimental area	3	5	15	2	Fire extinguishers will be maintained and the numbers will be called in case of emergency will be hung in a visible place in the experiment area in the school where the experiment is conducted, in the size and position in accordance with the safety and health signs regulation.	Employer/ Employer's Attorney		1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
7	EMERGENCY	WARNING AND CAUTION MARKINGS	Failure to prepare an emergency plan	Injury, panic, escape or delay in response	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	5	15	2	1. An emergency plan will be prepared 2. Employees will be informed about the emergency plan.	Employer/ Employer's Attorney		1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
8	EMERGENCY	GENERAL	Lack of personnel with first aid knowledge	Accidents due to ignorance	Employees have basic first aid training.	Persons in the experimental area	4	4	16	2	At least one employee will be provided with first aid training.	Employer/ Employer's Attorney		1	4	4	1.08.2022	1	4	4	Continuous Control

Appendix A Table A1 (Continued)

9	MEDICINE CABINET	GENERAL	Lack of medicine cabinet in the working area	Insufficient first aid	There is a medicine cabinet in the school hallway.	Persons in the experimental area	4	4	16	2	1. A medicine cabinet will be provided to the working area. 2. The medicine cabinet will be checked at regular intervals	Employer/ Employer's Attorney	1	4	4	1	1.08.2022	1	4	4	Continuous Control
10	HAND TOOLS	EXPERIMENTAL AREA	Lack of cabinets for hand tools	Injury	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	4	16	2	1. Hand tool cabinets will be provided 2. The finished tools shall not be in the active area or on the test setup during the test. 3. After each work, the tools will be placed in the cabinet.	Employer/ Employer's Attorney	1	4	4	1	1.08.2022	1	4	4	Continuous Control
11	HAND TOOLS	EXPERIMENTAL AREA	Hand tools not complying with CE standard	Injury	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	4	16	2	Hand Tools will be CE marked	Employer/ Employer's Attorney	1	4	4	1	1.08.2022	1	4	4	Continuous Control
12	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Contact with probes during electrical charging	Electrocution, fire, explosion, limb loss	The stages are carefully followed by the electrical and machine teacher.	Persons in the experimental area	4	4	16	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	4	4	1	1.08.2022	1	4	4	Continuous Control
13	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Short circuit in the electrical terminal in the fixture area	Fire, explosion	There is a fire extinguisher	Persons in the experimental area	4	4	16	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	4	4	1	1.08.2022	1	4	4	Continuous Control
14	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Incorrect polarity connections of voltage cables	Electrocution, limb loss, death	The stages are carefully followed by the electrical and machine teacher.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
15	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Incorrect connection of probes and terminal poles during capacitor charging	Electrocution, fire, explosion, limb loss, death	The stages are carefully followed by the electrical and machine teacher.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
16	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Short circuit on capacitor	Fire, explosion	The stages are carefully followed by the electrical and machine teacher.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
17	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Electric shock during capacitor discharge	Electrocution, fire, explosion, limb loss, death	In order not to be too close during the discharge, a 1 m long insulated metal is checked.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE (Insulation Gloves) will be used and attention will be at the forefront in the works. 2. The remote detonation distance for the system will be increased 3. Remote blasting system will be applied 4. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
18	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Electric shock when making measurements on a capacitor	Electrocution, fire, explosion, limb loss, death	The stages are carefully followed by the electrical and machine teacher.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
19	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Absence of grounding system	Electrocution, fire, explosion, limb loss, death	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	The grounding of the test device will be done by the electrician.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control

Appendix A Table A1 (Continued)

20	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Discharge in the wrong place during the test	Fire, explosion	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	1.08.2022	Continuous Control
21	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Explosion/burning of capacitors during charging	Fire, explosion	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	1.08.2022	Continuous Control
22	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Explosion/burning of Capacitors during discharge	Fire, explosion	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Required PPE will be used 2. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	1.08.2022	Continuous Control
23	ELECTRIC	EXPERIMENTAL AREA	Arc jump	Fire, explosion	Keeping the appropriate distance	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. Before each work, the areas where arc may occur will be checked and the appropriate arc distance will be left according to the current. 2. Zones that can be isolated will be isolated 3. Necessary PPE will be used 4. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	1.08.2022	Continuous Control
24	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Compressors close to workers	Explosion	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Compressor will be removed from the employees, a separate protective area will be created for the device.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	1.08.2022	Continuous Control
25	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Noise caused by blasting during the experiment	Loss of hearing	PPE is used	Persons in the experimental area	4	2	8	3	1. CE marked earplugs will be used by the people in the experiment area. 2. Noise measurements will be made and noise protectors will be provided and used according to the results.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	1.08.2022	Continuous Control
26	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Hand injuries during handling/cutting of test materials	Falling, crushing, pinching/cutting/loss of limb	Care is taken when working with parts and PPE is used	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. Care will be taken while transporting the test materials. 2. Care will be taken that the floor is not wet or slippery.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	1.08.2022	Continuous Control
27	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Absence of spirals and sander protective guards during cutting operations	Falling, crushing, pinching/cutting/loss of limb	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	Machines will not be operated without protective covers.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	1.08.2022	Continuous Control
28	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Inadequate fixation of materials during drilling operations	Falling, crushing, pinching/cutting/loss of limb	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	The materials to be drilled will be fixed with a vise and checked before the work.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	1.08.2022	Continuous Control
29	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Hand injuries during assembly and disassembly processes between experiments	Falling, crushing, pinching/cutting/loss of limb	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	Necessary PPE (gloves) will be used and attention will be at the forefront in the works.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	1.08.2022	Continuous Control
30	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Pneumatic switches not being fixed to the floor	Injury, arc/burn/explosion due to undesired ground contact in the experimental setup	The pneumatic switch is fixed to the table edge	Persons in the experimental area	3	3	9	3	It will be ensured that the materials that are at risk of moving during the test are fixed to the floor in a place where there will be no falling and tipping problems and that their connections are fixed.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	1.08.2022	Continuous Control
31	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Not fixing the capacitor group to the ground	Injury, arc/burn/explosion	Capacitors are on the table.	Persons in the experimental area	4	4	16	2	The capacitor group will be fixed to the ground so that it will not fall and its connections will be checked before each operation.	Employer/ Employer's Attorney	1	4	4	1	4	1.08.2022	Continuous Control

Appendix A Table A1 (Continued)

32	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Welding fixture not fixed to the floor	Injury, arc/burn/explosion	The fixture is free on the table.	Persons in the experimental area	4	4	16	2	The welding fixture will be fixed to the floor and its connections will be checked before each work.	Employer/ Employer's Attorney	1	4	4	1	4	4	Continuous Control
33	MECHANICAL	EXPERIMENTAL AREA	Falling pieces	Falling, crushing, pinching/cutting/loss of limb	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	Necessary PPE (steel-toed shoes) will be used and attention will be at the forefront in the works.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	Continuous Control
34	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Welding fumes and vapors emitted into the environment	Occupational respiratory system diseases, poisoning	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. There will be a ventilation system in the environment to prevent exposure to welding fumes. 2. In cases where ventilation is not possible, general ventilation will be provided by keeping doors and windows open in closed areas.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	Continuous Control
35	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Welding beam	Eye diseases, occupational disease	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	Welding glasses or screens will be used for welding.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	Continuous Control
36	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Improper electrical connections of the welding assembly	Burning, explosion, death	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Cable connections will be made by an electrician and checked continuously.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	5	Continuous Control
37	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	The presence of flammable, combustible, explosive materials near the welding place	Burning, explosion, death	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	1. There will be no flammable explosives and flammable materials in the welding area. 2. Necessary PPE will be used and attention will be at the forefront in the works. 3. There will be a 6kg dry chemical powder fire extinguisher in the work area against fire.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	5	Continuous Control
38	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Hot spark splash	Burning	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	The experimental setup will be located behind the protective screen.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	Continuous Control
39	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Welding in narrow spaces	Poisoning, occupational respiratory disease	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. There will be ventilation in the working area 2. It will be done with a remote blasting system so that no one is in the welding room. 3. No one will be in the room except when necessary.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	Continuous Control
40	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Failure to periodically check the welding assembly	Electric shock, fire, explosion, death	Connection checks are made.	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. Connections will be checked before each experiment 2. As fixed elements may be loose, they will be checked in each test. 3. The parts that need to be cleaned will be cleaned with tools such as files, wire brushes, and sandpaper to prevent arc formation and burning.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	Continuous Control
41	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Random connection of welding cable splices	Electric shock, fire, explosion, death	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Cable connections will be made by an electrician and checked continuously.	Employer/ Employer's Attorney	1	5	5	1	5	5	Continuous Control

Appendix A Table A1 (Continued)

42	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Setting the current settings to high	Electric shock, fire, explosion, death	Observation is made from the panel on the measuring instrument.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
43	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	High voltage settings	Electric shock, fire, explosion, death	Observation is made from the panel on the measuring instrument.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
44	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Improper grounding	Electric shock, fire, explosion, death	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
45	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Incorrect connection of cables to the machine	Electric shock, fire, explosion, death	There is no current measure	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
46	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Arc noise during welding	Hearing loss	Earplugs are used.	Persons in the experimental area	3	9	3	3	Employer/Attorney	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
47	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Not insulating the welding fixture	Electric shock, fire, explosion, death	Insulated with electrical tape	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
48	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Contacting the welding fixture without system discharge	Electrocution, limb loss, death	The grounding piston is actuated and after measuring that the current is below 40 Amperes, contact is made.	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
49	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Contacting the system during measurement operations	Electrocution, limb loss, death	Attention is paid	Persons in the experimental area	4	5	20	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
50	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Shock wave generated during welding causes window panes to burst	Injury, environmental damage	Doors and windows are left open in the experiment room	Persons in the experimental area	4	4	16	2	Employer/Attorney	1	5	5	1.08.2022	1	5	5	Continuous Control
51	WELDING	EXPERIMENTAL AREA	Cleaning the test materials with chemical material	Poisoning by inhalation of chemical substance	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	9	3	3	Employer/Attorney	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control

Appendix A Table A1 (Continued)

52	WARNING AND CAUTION	GENERAL	Not using signs and plates when texting	Injury due to work accident	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	Warning signs will be posted	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
53	ERGONOMICS	GENERAL	Employees standing up	Occupational diseases in advanced stages of musculoskeletal pain	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. Employees will be given training on ergonomics 2. In order to prevent the employees from working standing up, there will be chairs where they can sit between the experiments. 3. Continuous position will be changed at regular intervals 4. It will be ensured that they take breaks 5. Exercises to relax the muscles will be done	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
54	ERGONOMICS	GENERAL	Employees' leaning work	Low back and neck pain, occupational diseases in advanced stages	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	Measures will be taken to prevent employees from working in the same position all the time. 1. Employees will be given training on ergonomics 2. Technical support will be received regarding this situation 3. Employees will be prevented from working by bending over 4. Continuous position changes will be provided 5. It will be ensured that they take breaks at regular intervals	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
55	PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT	GENERAL	Personal protective equipment does not have the CE mark and does not have a Turkish user manual	Injury due to work accident	Necessary warnings are made.	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. The personal protective equipment materials to be used will have the CE mark 2. They will have a Turkish user manual for the employees to understand easily	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
56	PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT	GENERAL	Employees not wearing ear protection	Hearing loss	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. During each experiment, everyone in the experiment area will wear ear protection. 2. Equipment shall bear CE mark	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
57	PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT	GENERAL	Employees not using safety glasses	Eye diseases	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	CE marked protective glasses will be provided and used	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
58	PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT	GENERAL	Employees not using steel-toed shoes	Injury due to falling material	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	Employees will be provided with shoes suitable for the job	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
59	PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT	GENERAL	Employees not using isolated gloves	Electrocution, limb loss, death	There is no current measure	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. Everyone who will come into contact with the test device during each experiment will use insulated gloves. 2. Equipment shall bear CE mark	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control
60	GENERAL	GENERAL	Disorganized work area	Accidents at work	The experiment area is arranged after the work is finished.	Persons in the experimental area	3	3	9	3	1. The work area will be arranged after the intermediate operations are done 2. Appropriate storage and stacking will be done in the working area. 3. The continuity of this situation will be ensured.	Employer/ Employer's Attorney	1	2	2	1	2	2	1.08.2022	1	2	2	Continuous Control





Anaerobik parçalanma süreçlerine iz element ilavesi ve etki mekanizmaları

Supplementation of trace elements to the anaerobic digestion and effect on the mechanisms in the processes: A review

Dilan Toprak^{1,*} 

¹ Danimarka Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 2800, Kongens Lyngby Danimarka

Öz

Anaerobik parçalanma çeşitli mikrobiyal toplulukların aktivitelerine ve iş birliğine dayalı olan hassas ve çok aşamalı kompleks süreçleri içerir. Bu süreçteki mikroorganizmaların büyümesi için hem organik madde hem de iz elementlerin ilavesi önemli bir ihtiyaçtır. İz elementler organizmaların ve enzimlerin yapısına katılarak biyokimyasal reaksiyonların kararlılığını sağlamaktadır. Optimum seviyelerdeki iz element ilavesi daha fazla organik madde bozunması, düşük uçucu yağ asidi konsantrasyonu ve yüksek biyogaz üretimi ile olumlu etkileri olduğu bilinmektedir. İz elementlerin türleşmeleri ile biyoyararlanımı arasındaki ilişkinin yeterince anlaşılmadığı durumlarda etkisiz iz element dozlama stratejileri oluşmaktadır. İz element türü ve ideal iz element konsantrasyonları sistemdeki mikroorganizmaların ihtiyaçlarına göre çeşitlilik gösterir. Öte taraftan anaerobik süreçlere iz elementlerin ilavesi kullanılan substrat, teknoloji, işletme koşulları, karmaşık biyokimyasal reaksiyonlar, biyoyararlanım gibi birçok parametrenin etkilediği ideal konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi sistemin sağlıklı ve etkili çalışması açısından önem arz etmektedir. Bu derleme çalışması ile amaç iz elementlerin anaerobik parçalanma süreçlerine ilavesinin gerekçeleri ve anaerobik süreçlerdeki akıbeti hakkındaki bilgileri özetlemektir.

Anahtar kelimeler: Anaerobik parçalanma, Biyogaz, Biyoyararlanma, İz element, Metan

1 Giriş

Dünyada bir yandan enerjiye olan talep artarken diğer yandan da insanların tüketim alışkanlıkları sonucu oluşturdukları atıkların miktarı da artmaktadır. Dolayısıyla yenilenebilir alternatif enerji kapsamında atıkların biyoenerjiye dönüştürüldüğü anaerobik proseslerin geliştirildiği araştırmalar giderek daha fazla ilgi görmektedir [1]. Üretilen biyogaz ısınmada, elektrik enerjisinde, araç yakıtında, parçalanma sonucu kalan organik atıklar ise yüksek kalitede gübreye dönüştürülerek kullanılmaktadır [2].

Anaerobik parçalanma, çeşitli organik atıkların (evsel atıklar, yiyecek atıkları, hayvan gübresi, atıksu vb.) oksijensiz ortamda farklı mikroorganizma grupları tarafından dört adımda parçalanması ile CH₄ üreten bir

Abstract

Anaerobic digestion involves delicate and multi-step complex processes based on the activities and cooperation of various microbial communities. The addition of both organic matter and trace elements is an important need for the growth of microorganisms involved in anaerobic digestion. Trace elements contribute to the structure of organisms and enzymes, ensuring the stability of biochemical reactions. Optimum levels of trace element addition are known to have positive effects with greater organic matter degradation, lower volatile fatty acid concentration and higher biogas production. In cases where the relationship between speciation and bioavailability of trace elements is not well understood, ineffective trace element dosing strategies are formed. Trace element species and ideal trace element concentrations vary according to the needs of the microorganisms in the biosystem. On the other hand, the addition of trace elements to anaerobic processes is affected by many parameters such as the substrate used, technology, operating conditions, complex biochemical reactions, and bioavailability. These parameters are important for determining the optimum trace element levels needed and for the healthy and effective operation of the system. The aim of this review is to summarize the information about the reasons for the addition of trace elements to the anaerobic digestion system and their fate in anaerobic processes.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Bioavailability, Methane, Trace element

yöntemdir [3]. Hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez fazlarında görev alan mikroorganizmaların birlikte bir dengede ve uyum içinde çalışmaları ne kadar iyiye süreçlerin performansı da o düzeyde kararlı olacaktır [3,4]. Bu amaçla pH [5], sıcaklık [6], HRT [7], organik madde miktarı [8] gibi işletme parametreleri için literatürde birçok optimizasyon çalışması mevcuttur. Bahsi geçen fiziksel koşulların uygun olmasına rağmen sistemin kararsız olması veya metan üretiminin beklenen seviyede olmaması durumlarında mikroorganizmaların mikro nutrient olarak adlandırılan iz element ihtiyaçlarının belirlenmesi ve sağlanması gerekmektedir [9]. İz elementler biyokimyasal reaksiyonlarda önemli rol oynamaktadır. Ayrıca anaerobik parçalanma sonucu oluşan biyogazın veya içeriğindeki metan oranının artmasına katkı sağlamaktadır [10]. Fakat iz

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dilantoprak1@gmail.com (D. Toprak)
Geliş / Received: 11.03.2023 Kabul / Accepted: 05.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1242942

elementlerin anaerobik süreçlerdeki etki mekanizmaları tam belirlenmediği için günümüzde konuyla ilgili araştırmalar halen devam etmektedir.

İz elementler anaerobik parçalanmadaki mikroorganizmaların büyümesinde yapı taşı olarak kullanılmalarının yanı sıra enzimatik aktivitelerde ve kimyasal reaksiyonlarda kullanılmaktadır [9]. İz element eksikliği uçucu yağ asitlerinin artışına ve anaerobik parçalanma performansının düşmesine sebep olduğundan sınırlayıcı bir faktör olarak belirtilir. Ni, Co, Fe, Se, Cu gibi temel iz elementlerin mevcudiyeti kararlı bir süreç için gereklidir [10]. Gustovsson ve arkadaşları Ni ve Co elementlerini sınırladıkları çalışmalarında asetoklastik Methanosarcinales'ten hidrojenotrofik Methanoculleus'a doğru metanojen popülasyonunda kayma olduğunu ve sonuç olarak uçucu yağ asitlerinin artışına sebep olduğunu belirtmişlerdir [11]. Fe, organik atıkların biyobozunurluğunu arttırmakta ve hidrojenotrofik metabolizmaya yardım etmektedir. Gıda atıklarının anaerobik parçalanmasını stabilize etmek için Fe kullanımı en etkili iz element olarak belirtilmiştir. Ni, amonyak ve sülfür toksisitesini azaltmakta, uçucu yağ asitlerinin konsantrasyonunu dengeleyerek biyogaz üretimini uyarmaktadır. Sığır gübresinin kesikli çalışmasında Ni ilave edilmiş ve hem biyogaz hem de içeriğindeki metan miktarında artış elde edilmiştir [7]. Gıda atıklarının anaerobik parçalanmasında ve yüksek amonyak konsantrasyonlarında çalışılması için Se ve Co ilavesinin önemli olduğu belirtilmiştir. [12]. Quinlan vd. çalışmasında Cu'nun selülozun bazı oksidatif metaloenzimler tarafından oksidatif bozulmasını arttırdığını belirtmiştir [13]. Başka bir çalışma da ise evsel atıkların anaerobik parçalanmasına Fe, Co, Ni ve Mo iz elementlerinin ilavesiyle metan veriminin %18.7 arttığı görülmüştür [14]. Sonuç olarak iz elementleri anaerobik parçalanma süreçlerindeki rollerinden dolayı sistem verimliliğini etkileyen önemli bir işletme faktörü olarak tanımlayabiliriz.

Bahsedilen etkilerine rağmen anaerobik parçalanma süreçlerinde performans artışı için iz elementlerden ziyade reaktör tipleri, mikroorganizma yapıları, substrat karışımları ve substrat ön işlem süreçlerinin etkileri literatürde yoğun olarak çalışılan ana konulardır. Bu durumun muhtemel bir sebebi her uygulamanın kendi içinde özgün olmasıdır. Aynı sektörde çalışan iki ayrı fabrikanın kullandıkları farklı teknoloji ve proses suyu nedeniyle farklı kompozisyonda atıksu oluşabilir. Dahası, bu atıksuların anaerobik parçalanmasında farklı mikroorganizma türleri görev alabilir. Bu nedenle iz element ihtiyaçları uygulamada spesifik olup yapılan çalışmalardan bir genellemeye gidilmesi zordur. Ancak eksiklikleri önemli performans düşüklüklerine sebep olabildiğinden önemli bir proses bileşeni olarak değerlendirilmelidirler.

2 Anaerobik parçalanma süreçlerine iz element ilavesi

Anaerobik arıtma süreçlerinin performansı pH, sıcaklık, alkalinite, C/N oranı, iz elementler, sülfür ve amonyak konsantrasyonu gibi parametrelerden etkilenir ve yüksek performans için ideal seviyelerinin ayarlanması gerekir [15]. Anaerobik parçalanmada görevli mikroorganizmaların büyümesi için hem organik madde hem de iz elementlerin

ilavesi önemli bir ihtiyaçtır [16]. Ayrıca anaerobik parçalanmadaki biyokimyasal reaksiyonların kararlı bir şekilde gerçekleşmesi için iz element ilavesinin dengeli olması gerekmektedir [17]. Optimum seviyeden fazla ilave edilen iz elementler inhibisyon etkisi göstererek mikroorganizma faaliyetlerini kısıtlayabilmektedir [9]. İz element ihtiyacı bu iz elementlerin tuzlarından çözümler hazırlanıp [18,19] ya da içeriğinde iz element bulunan atıkların [20] sisteme ilave edilmesi ile karşılandığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu çalışmaların genel amacı anaerobik süreçlerin kararlılığını sağlamak ve biyometan üretiminin artırılmasıdır.

Önceki çalışmalarda, anaerobik parçalanmada Fe, Cu, Ni, Co, Mg, Mo, Se ve W temel iz elementlerin [21–23] ilave edilmeleri ve etki mekanizmaları araştırılmıştır. Metanojenlerin anaerobik mikroorganizmalar içerisinde iz elementlerce zengin enzimatik yolları en fazla kullanan grup olduğu belirtilmiştir [24]. Co, özellikle metanojenler için son derece önemli bir iz elementtir. Co, metan üretiminde rol alan metilaz enzimi için bir kofaktör olarak görev yapan B12 vitamininin çekirdeğini oluşturmaktadır. Asetatın üretiminde ve tüketiminde anahtar bir enzim olan Co metiltransferaz ve karbon mono dehidrojenaz (CODH) kofaktörüdür [25]. Co metil transferi ve radikal oluşumundaki hayati rollerinin yanı sıra hücre zarında aktif taşımada da önemli bir rol oynadığı bildirilmiştir [26].

Nikel, çoğu mikroorganizmanın fizyolojik aktivitelerini ve metabolizmalarını sürdürmeleri için gerekli olan iz elementtir [27]. Ni içeren koenzim F430, metanojenlerde koenzim M'nin metan'a indirgenmesinde rol oynayan metil koenzim M redüktazın çalışması için gerekmektedir [28]. Demir hem elektron alıcısı hem de donör olarak işlev görmektedir ve CO₂'nin CH₄'e dönüştürülmesi için metanojenik arkenin taşıma sistemine katılmaktadır. Ayrıca anaerobik parçalanma sürecinde hidrojen sülfür içeriğini azaltan çökelti oluşturmak üzere sülfüre bağlanmaktadır [16]. Liu ve arkadaşları Fe ilavesinin hidroliz ve fermentasyon aşamalarını hızlandırdığını belirtmişlerdir [29]. Öte yandan Cu, selüloz enziminin katalitik merkezinde kofaktör olarak işlev görmektedir ve enzim aktivitesini uyarmaktadır [30]. Magnezyumun, metanojenlerin performansını arttırdığı belirtilmiştir [31]. Enzimatik reaksiyonlarda kofaktör olan Mg kationunun anaerobik sisteme ilavesi, metanojenlere karşı sodyum toksisitesinin azaltılmasında etkilidir [31,32]. W ve Mo elementleri propiyonat oksitleyicilerle format üretimini katalize eden format dehidrojenaz (FDH) gibi enzimlerde bulunur [33]. W içeren tüm enzimler, çoğunlukla anaerobik metabolizmaya sahip olan bakterilerde ve arkelerde bulunmuştur [16]. Anaerobik arıtma sürecinde Se eksikliğinin, bazı metanojenler için büyümeyi sınırladığı ve mikrobiyal aktivitelerini azaltarak sistemin başarısızlığına sebep olduğu rapor edilmiştir [34,35]. Lignoselülozik atıklardan biyometan oluşumu, her aşamasında farklı iz element gerektiren birçok enzim ve kofaktörün bulunduğu anaerobik aşamalardan oluşmaktadır [21,36]. Mg, metal-lignin kompleks yapısına katılarak lignoselülozik materyallerin biyodegradasyonunu arttırmıştır [37]. Yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonu anaerobik sistemlerde asetat üretimi

için başlıca bir yoldur ve genelde metanojenik arkea ve sülfat indirgeyen bakterilerin sintrofik ilişkileri ile gerçekleşmektedir. Yapılan çalışmada bu süreç ve sintrofik ilişkinin Mg gerektirdiği belirtilmiştir [38]. Çalışmalardan anlaşıldığı üzere sisteme giren organik atıkların genel bileşimine bağlı olarak anaerobik çürütücülerde farklı mikrobiyal bozunma yolları ve biyokimyasal ortamlar oluşmaktadır. İdeal iz element konsantrasyonunun biyolojik süreçlere ilave edilmesi ile anaerobik parçalanma sistemi daha kararlı işletilmekte ve performansını arttırmaktadır. Enzim ve organizmaların yapısına katılan bazı iz elementler **Tablo 1**'de sunulmuştur.

Tablo 1. Enzim ve organizmaların yapısına katılan iz elementler [39]

Enzim	Organizmalar	İz element
Methyltransferaz	Metanojenler/ asetojenler	Co (B12)
B12 enzim	Birçok organizma	Co (B12)
CO-dehidrojenaz	Metanojenler/ Asetojenler	Co, Ni, Fe
Asetil-CoA sintaz	Moorella thermoacetica	Fe, Ni, Cu
Tetrakloroethan redüktif dehalojenaz	Dehalospirillum multivirans	Co, Fe
Hidrojenaz	Desulfovibrio, Escherichia coli	Fe, Ni
Amonyum monooksijenaz	Nitrosomonas europae, anaerobes	Cu, Fe, Zn, Mn
Formiate dehidrojenaz	Methylobacterium	Mo, W
Formilmetanofuran	Methanobacterium	Mo, Se
Aldehid oksidredüktaz	Clostridium	Mo, W
Glisin redüktaz	Escherichia coli	Se

2.1 İz elementlerin hidroliz, asidojeniz, asetogenez ve metanojeniz basamaklarındaki rolleri

İz elementlerin anaerobik arıtma süreçlerindeki hidroliz ve asidojeniz basamaklarındaki rolünün araştırıldığı çalışmalar diğer basamaklara nazaran daha azdır. Kim ve ark., Fe, Co ve Ni iz elementlerinin hidroliz ve asidojeniz süreçlerinin optimizasyonu için önemli olduğunu, KOİ çözünürlüğünü ve organik asit üretimini arttırdığını bildirmişlerdir [40]. Başka bir çalışmada termofilik bir anaerobik parçalanma sistemine FeCl₃ takviye edilerek hidroliz fazının ve asitleştirme sürecinin hızlandırıldığı vurgulanmıştır [41]. Hidroliz ve asidojeniz basamaklarındaki mikroorganizmaların büyümelerine iz element ilavesinin fayda sağladığından bahsedilebilir [42].

Asetogenez basamağı CO₂, CO, metanol ve format gibi karbon bileşiklerinin asetata dönüştürüldüğü reaksiyonları içermektedir. Bu biyokimyasal reaksiyonlarda bazı metaloenzimler bulunmaktadır. Asetojen *Clostridium thermoaceticum* bakterisinin enzim izolasyonu ile genellikle format dehidrojenaz (Fdh) ve karbon monoksit dehidrojenaz (CODH) enzimleri belirlenmiştir [43]. Bu enzimler aktif yapılarını oluşturmak için Fe, Ni, Zn, Se ve W iz elementlerine ihtiyaç duyarlar [44].

Metanojeniz, biyogaz ve metanın üretildiği anaerobik arıtım sürecinin son ve en hassas aşamasıdır. Bu basamaktaki reaksiyonlar metanojenler ve arkealar tarafından

gerçekleşmektedir. Biyolojik aktivitelerini devam ettirmeleri için iz elementlere ihtiyaç duyarlar. Literatürdeki çalışmalara göre genel olarak metanojenlerin Fe, Zn, Ni, Cu, Co, Mo ve Mn iz elementlerine ihtiyaç duydukları belirtilmiştir [45,46]. Anaerobik parçalanma performansını arttırmak için her bir metanojen türünün ihtiyaç duyduğu temel iz element konsantrasyonlarının uyarıcı seviyelerde olması gerekmektedir [45,47,48]. Farklı substratların anaerobik parçalanmasında metan üretim performansının araştırıldığı çalışmalarda iz element türleri ve performansı arttıran optimum seviyeleri **Tablo 2**'de sunulmuştur.

Tablo 2. Farklı substratların anaerobik parçalanmasında ihtiyaç duyulan bazı iz elementlerin optimum seviyeleri

İz element	Substrat	İz element konsantrasyon (mg/L)	Referans
Fe, Co, ve Ni	Yemek atıkları	150, 0.5 ve 10	[49]
Co, Fe ve Ni	Tarım atıkları	0.13, 74.40 ve 2.48	[10]
Fe	Mısır sapı	200	[14]
Co ²⁺ , Mo ²⁺ , Ni ²⁺ ve Fe ³⁺	Yemek atıkları ve domuz gübresi atıksuyu	2, 5, 10 ve 100	[20]
Co	Kağıt endüstrisinden alınan aktif çamur	0.5	[50]
Fe, Cu, Ni, Co ve Mg	Kağıt endüstrisi atıksuyu	196.8, 0.01, 1.30, 1.31, ve 50.63	[51]
Mo ve W	Evsel katı atık	0.044 ve 0.658	[52]
Mo, Se ve Mn	Pirinç samanı	0.01, 0.1 ve 1.0	[53]

2.2 İz element-enzim ilişkisi

Mikroorganizmalar kimyasal reaksiyonlarda biyokatalizör olarak görev alan birçok enzim üretmektedir. Genel olarak enzimler kimyasal reaksiyonların oluşması için gerekli olan aktivasyon enerjisini düşürerek reaksiyon hızını arttırmaları [54]. Enzimlerin aktifleşerek kimyasal bir reaksiyonu katalize etmesi için konfigürasyonunda kofaktör olarak iz elementlere ihtiyaç vardır. İz elementlerin enzim yapısındaki bu rolleri sayesinde anaerobik parçalanmada organik maddelerin hidrolizini, asitleşmesini, metanojen büyümesini etkilediğinden söz edilebilir [30].

Anaerobik parçalanmadaki kompleks mikroorganizmaların her biri kendi karakteristik metabolizmaları ile organik maddeleri biyokimyasal reaksiyonlarla metana dönüştürmektedir [55]. Bu süreçte her bir basamakta bulunan mikroorganizmaların ürettiği enzimler, substratın nihai ürünlere dönüşümünü gerçekleştiren aktivitelerde rol oynar. [24]. Anaerobik parçalanmanın sürdürülebilirliği için görev alan enzimlerin ve bu enzimlerin doğru yapısal oluşumu için iz elementlere ihtiyaç vardır. Anaerobik reaktörlerde organik yüklemenin uzun vadeli yapıldığı ve sürekli işletildiği koşullarda iz element eksikliği problemi oluşabilir veya kısa vadeli işletilmesinde aşırı yükleme sonucunda mikrobiyal bileşenlerde farklı türlerde bolluk ve aktivitelerinde dalgalanmalara sebep olabilir. Bu durum organik maddenin mineralizasyonunda ve metan üretim yollarında rol oynayan

hem mikroorganizmaların hem de bunların enzimlerinde çeşitlilik oluşturur [56,57].

Metanojeniz, iz elementlerce zenginleştirilmiş enzimatik yolun en fazla kullanıldığı biyolojik süreçlerden biridir. Metanojenizde asetoklastik (asetik asit kullanan metanojenler), CO₂/H₂ ve metilotrofik olmak üzere üç temel biyokimyasal yol vardır. Substrat olarak asetat kullanan asetoklastik yol, anaerobik arıtım prosesinde metan oluşumunun %70'ini oluştururken, geriye kalan %30'u CO₂/H₂ yoluyla gerçekleşmektedir [58]. Çeşitli metaloenzimleri içeren asetoklastik ve CO₂/H₂ yollarının çalışma mekanizması ve bu enzimlerin iz element gereksinimleri izleyecekleri yola bağlı olarak farklılık gösterecektir [23]. Örneğin, asetoklastik yolda gerekli olan metaloenzim karbon monoksit dehidrojenaz/ asetil-koenzim A sintaz (Cdh) kompleks enzimidir. Alt birimi olan CdhA'nın yapısında Fe ve Ni elementlerini içerdiği bulunmuştur [44]. Öte yandan, formilmetafuran dehidrojenaz, CO₂/H₂ yolunun biyokimyasal reaksiyonunu başlatmak için en az bir Mo veya tungsten bağlayıcı elemanına ihtiyaç duyan iki izoenzim içermektedir [59]. Son olarak CH₃H₄M (S) PT-koenzim M metiltransferaz (Mtr) enzimi kofaktör 5-hidroksibenzimidazolilcobamid (Co elementli) içermekte ve Metil koenzim M redüktaz (Mcr)'in etkin bölgesindeki F430 kofaktörünün kristal yapısı da iki nikel içermektedir [55].

Demir en çok ihtiyaç duyulan eser elementtir, ardından nikel ve kobalt, eser miktarda molibden veya tungsten ve çinko gelir. Fe genellikle Fe-S kümelerindeki elektronların aktarımı için kullanılır [23], Ni ya Fe-S kümelerine bağlanabilir ya da metanojenlerin ayırt edici özelliği olan porfirin (kofaktör F430) merkezinde bulunur. Kobalt, metil grubu transferinde yer alan kobamidlerde bulunurken, Zn birkaç enzimde tek bir yapısal atom olarak oluşur. Molibden veya tungsten, sırasıyla "molibdopterin" veya "tungstopterin" oluşturmak için bir "pterin" kofaktörüne bağlanır ve elektron redoks reaksiyonlarının katalize edilmesinde rol oynar. Na ve Se gibi diğer alkali metaller ve metaloidler de metanojeniz için gereklidir. Hücrenin metabolik aktivitesini sürdürmek için bu iyonlara ihtiyaç vardır [23,60].

2.3 İz elementlerin biyoyararlanımı

Anaerobik parçalanma süreçlerinde toplam iz element konsantrasyonu genellikle anaerobik parçalanmanın uyarıldığı ve toksik etkisinin değerlendirildiği seviyesi ile belirlenmektedir. Biyoyararlanım ise biyolojik sistemlerdeki etkileşimin oluşması için elementlerin uygun derecesi olarak ifade edilmektedir [61]. Aslında toplam iz element konsantrasyonu iz elementin biyoyararlanımını ifade etmemektedir [16]. İz elementlerin biyoyararlanımı, anaerobik reaktörlerin işletme koşulları ve reaktördeki fiziksel, kimyasal ve biyolojik mekanizmalarına bağlı olarak değişmektedir [62]. Anaerobik parçalanma süreçlerine ilave edilen iz elementler biyoyararlanım hakkındaki bilgi eksikliğinden dolayı etkili olmayabilir [16].

İz elementlerin biyoyararlanımı biyoreaktördeki katı ile sıvı faz arasındaki komplekslerin etkileşimlerine göre değişmektedir. Mikroorganizmalar tarafından serbest iz

element iyonlarının alınma mekanizması hücre membranından transferi ile gerçekleşmektedir. Öte yandan, iz elementler biyokütle ile etkileşime geçmeden önce sıvı fazda organik, inorganik kompleks formları ve sülfür çökelekleri gibi biyokimyasal süreçlerden geçmektedir [16,63]. Bu yüzden iz elementler ile biyokütle ve sıvı fazın etkileşimlerinin anlaşılması gerekir [64].

İz elementlerin anaerobik parçalanma süreçlerine ilave edildikleri formları ve formülleri biyoyararlanım seviyelerini etkileyen önemli bir parametredir. Biyoyararlanım seviyesi ilave edilen iz elementlerin kimyasal türleşmesine bağlı olarak farklı sonuçlar oluşturmaktadır. Feroso ve arkadaşları tarafından, Co'nun B12 vitamini formunda takviyesinin diğer formlarına (CoCl₂ vb.) nazaran çok daha etkili olduğunu belirtmiştir [65]. Ayrıca iz elementlerin birlikte ilave edilmeleri ile gerçekleşen etkileşimleri ve reaksiyonları ihtiyaç duyulan ideal seviyelerini değiştirebilmektedir. Farklı metaller, oluşturdukları farklı kinetik denge ile bir başka metalin biyoyararlanımını etkileyebilmektedir [66]. Literatürde anaerobik çürütücüdeki Fe konsantrasyonunun Co ve Ni'nin FeS ile adsorpsiyonu, birlikte çökmesi veya iyon ikamesini (Fe-Ni/Co-S kompleksi gibi) teşvik ettiği belirtilmiştir [64,67]. Bu nedenle, gerekli iz element miktarını azaltmak ve metanojenik aktiviteyi en üst düzeye çıkarmak için türleşmelerinin biyoyararlanımlarını nasıl etkilediğini anlamak da önemlidir [11,33].

İz elementlerin anaerobik parçalanmadaki biyoyararlanımını genellikle sülfür formları ile kontrol edilmektedir. İz elementler sülfür varlığında çok düşük çözünürlüğe sahip olduklarından serbest iyon konsantrasyonları oldukça düşük olmaktadır. Dolayısıyla anaerobik mikroorganizmalar tarafından biyoyararlanımını gerçekleştirememektedir [16]. Barber ve Stuckey ise makalesinde sülfür çökeltilerinin iz elementlerin biyoyararlanımını azalttığını belirtmişlerdir (Fe>Co>Ni şeklindeki sıralama en eksik olandan başlamıştır) [68]. Ayrıca redoksa duyarlı olmayan Co, Ni, Zn ve Cu gibi iz elementler birçok organik ve inorganik kompleksler oluşturmaktadır. İz element sınırlaması durumunda redoksa duyarlı olmayan iz elementlerin biyoyararlanımının arttığı belirtilmiştir. Çünkü bu kompleks moleküller çökeltilerden daha hareketlidir. Bazı çalışmalarda bu komplekslerin varlığında düşen serbest iyonların denge konsantrasyonları EDTA gibi güçlü komplekslerin kullanımıyla iz element sınırlamasını azalttığı rapor edilmiştir [69]. PO₄³⁻ ve CO₃²⁻ gibi diğer önemli inorganik bağlar anaerobik reaktörlerin sıvı fazında yaygın olarak bulunmaktadır [69]. Bu inorganik bileşiklerin kompleksleri metal sülfür komplekslerinden daha zayıf olmasına rağmen, anaerobik ortamlar için yapılan çalışmalarda karbonat ve fosfat komplekslerinin iz element biyoyararlanımını üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmiştir [11].

İz elementlerin anaerobik parçalanmaya ilavesi, mikrobiyal metabolizma üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Yüksek konsantrasyonlarda veya düşük biyoyararlanım durumlarında mikroorganizma aktivitelerinin inhibisyonu söz konusu olabilir. Biyoyararlanımını etkileyen etmenlerin kompleks bir sistemde gerçekleştiği bilinmektedir. İz

elementlerin biyokimyasal süreçlerdeki etkileşimleri, ilave edildikleri formları, sistemde oluşturdukları türleşmeleri ve anaerobik reaktörün diğer işletme koşullarının birleşik etkisi sonucunda farklı biyoyararlanım seviyesine sebep olmaktadır. Karmaşık bir sistemin nihayetinde ortaya çıkan ideal iz element biyoyararlanımı anaerobik reaktörlerin biyogaz üretim performansını %15-30 oranında arttırabileceği literatürdeki çalışmalarla vurgulanmıştır. Ayrıca iz elementlerin biyoyararlanımının daha anlaşılır olması iz element maliyetlerini azaltmaya yardımcı olurken diğer taraftan da anaerobik arıtma çamurunun bileşimindeki iz element seviyesinin düşmesi tarımda gübre olarak kullanımını destekleyecektir.

2.4 İz element ilavesinin ekonomik katkısı

Biyogaz bileşiminde yaklaşık olarak %60 CH₄ ve %40 CO₂ ile eser miktarda H₂, NH₃ ve H₂S gazları bulunmaktadır. Biyogazın ısı değeri ve enerji verimliliği düşük olduğundan Wobbe indeks (gaz cihazlarının ısı yükleri bakımından gazların birbirlerinin yerlerine ikame edebilmelerini belirten katsayı değeridir. Hidrojen, metan ve doğalgazın Wobbe indeksi sırasıyla 11.528, 12.735, 12.837 kcal/Nm³) değeri de düşüktür [70]. Biyogaz genellikle elektrik ve ısı üretmek için kullanılır. Metan içeriği en az %95'e yükseltilebilir biyogaza biyometan denilmekte, doğrudan araç yakıtı olarak ve doğalgaza ihtiyaç duyulan diğer alanlarda kullanılabilir.

Anaerobik parçalanma süreçlerinde rol alan iz elementlerin ideal ilavesi anaerobik reaktörlerde kararlı bir performans oluşturmakta ve biyogaz içeriğindeki metan oranını arttırarak ekonomik değerine katkı sağlamaktadır. Cai ve diğerleri, iz element biyoyararlanımını araştırdıkları çalışmada tavuk gübresinin anaerobik parçalanmasında metan üretiminde %38 artış elde etmişlerdir [71]. Arıtma çamurunun anaerobik arıtımına enzim ve iz element ilavesinin etkisini araştırdığı bir çalışmada, Fe, Ni, Co, W, MO iz elementlerinden oluşan çözeltinin ilavesiyle kontrol grubuna nazaran %14.21 metan artışı elde edilmiştir [72]. Bir başka çalışmada ise Ni, Co ve Mg konsantrasyonlarını sabit tutarak, değişen Fe ve Cu konsantrasyonlarının biyometan ve biyogaz veriminde sırasıyla %11 ve %18 artış olduğu belirtilmiştir [51]. Kağıt endüstrisi atıksuyunun anaerobik parçalanmasına 0.5 mg/L Cu konsantrasyonunun ilave edildiği çalışma ile biyogaz içeriğindeki metan oranı %46 artmıştır [51]. 5000 m³/gün debili ve biyolojik bozunabilir KOİ değeri 4 kg/m³ olan kağıt endüstrisi atıksuyundan mezofilik şartlarda teorik olarak 3381 m³ CH₄/gün metan elde edilebilir. 1 m³ metanın elektrik enerji eşdeğeri 4.02 kWh kabulüyle [73] biyogaz içeriğindeki metanın %1 oranında artması ile sağlanacak enerjinin yaklaşık olarak 96845 kWh/yıl elektrik enerjisine denk geldiği hesaplanmaktadır. Bu çalışma özelinde Cu ilavesiyle sağlanan %46'lık metan artışı baz alındığında 4454.87 MW/yıl kazanç sağlanabilir.

3 Sonuçlar

Anaerobik parçalanma süreçlerine ideal iz element konsantrasyonlarının ilavesi sistemdeki mikroorganizmaların büyümelerini ve işlevlerini desteklediğinden önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu

derleme ile iz elementlerin anaerobik süreçlerdeki işlevleri ve etkileri özetlenmiştir.

- İz elementler mikroorganizmaların yapısına katılan ve biyokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesinde aktif rol oynayan önemli bir işletme parametresidir.
- Anaerobik parçalanma süreçlerinde kullanılan substrat içeriğine göre ihtiyaç duyulan seviyeleri değişmektedir.
- Anaerobik süreçlerin kararlılığını sağlamakta ve sistem performansını arttırmaktadır.
- Biyometan üretim verimini arttırdığından yenilenebilir enerji üretimine de doğrudan fayda sağlamaktadır.
- Mikroorganizmaların iz element biyoyararlanımı ile sistemdeki toplam iz element seviyeleri aynı durumu ifade etmemektedir. Sistemlerin gerçek ideal iz element seviyeleri biyoyararlanımının tespiti ile mümkündür.
- Her organik atığın ve anaerobik reaktörün iz element ihtiyacı uygulamada özgün olup yapılan çalışmalardan bir genellemeye gidilse bile her çalışmaya özgü optimize edilmesi gerekir. Eksiklikleri önemli performans düşüklüklerine sebep olan iz element ihtiyacının kontrolü ile süreçlerin kararlılığı sağlanabilmekte ve beraberinde de yenilenebilir enerji kategorisindeki biyometan üretimine katkı sağlamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] Y. Li, Y. Chen and J. Wu, Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. Applied Energy, 240, 120137, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>.
- [2] C. Carotenuto, G. Guarino, B. Morrone and M. Minale, Temperature and pH effect on methane production from buffalo manure anaerobic digestion. International Journal of Heat and Technology, 34, 425429, 2016. <https://doi.org/10.18280/ijht.34S233>.
- [3] M.O. Fagbohunge, B.M.J. Herbert, L. Hurst, C.N. Ibeto, H. Li, S.Q. Usmani and K.T. Semple, The challenges of anaerobic digestion and the role of biochar in optimizing anaerobic digestion. Waste Management, 61, 236249, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.028>.
- [4] W. Rudolfs and H.R. Amberg, White Water Treatment: I. Factors Affecting Anaerobic Digestion. Sewage and Industrial Wastes, 24, 11081120, 1952. <https://www.jsstor.org/stable/25031961>.
- [5] Y. Chen, J.J. Cheng and K.S. Creamer, Inhibition of anaerobic digestion process: A review. Bioresource Technology, 99, 40444064, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>.
- [6] J.N. Meegoda, B. Li, K. Patel and L.B. Wang, A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15, 2224, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>.

- [7] C. Mao, Y. Feng, X. Wang and G. Ren, Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540555, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>.
- [8] C. Gou, Z. Yang, J. Huang, H. Wang, H. Xu and L. Wang, Effects of temperature and organic loading rate on the performance and microbial community of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and food waste. *Chemosphere*, 105, 146151, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.018>.
- [9] P. Scherer and B. Demirel, Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane. *Biomass and Bioenergy*, 35, 992998, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.022>.
- [10] J.A. FitzGerald, D.M. Wall, S.A. Jackson, J.D. Murphy and A.D.W. Dobson, Trace element supplementation is associated with increases in fermenting bacteria in biogas mono-digestion of grass silage. *Renewable Energy*, 138 980986, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.051>.
- [11] J. Gustavsson, S. Shakeri Yekta, C. Sundberg, A. Karlsson, J. Ejlertsson, U. Skyllberg and B.H. Svensson, Bioavailability of cobalt and nickel during anaerobic digestion of sulfur-rich stillage for biogas formation. *Applied Energy*, 112, 473477, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.009>.
- [12] V. Facchin, C. Cavinato, F. Fatone, P. Pavan, F. Cecchi and D. Bolzonella, Effect of trace element supplementation on the mesophilic anaerobic digestion of foodwaste in batch trials: The influence of inoculum origin. *Biochemical Engineering Journal*, 70, 7177, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2012.10.004>.
- [13] R.J. Quinlan, M.D. Sweeney, L. Lo Leggio, H. Otten, J.-C.N. Poulsen, K.S. Johansen, K.B.R.M. Krogh, C.I. Jørgensen, M. Tovborg and A. Anthonsen, Insights into the oxidative degradation of cellulose by a copper metalloenzyme that exploits biomass components. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 108, 1507915084, 2011. <https://doi.org/10.1073/pnas.1105776108>.
- [14] Z.W. Khatri Shailendra and Kizito Simon, Synergistic effect of alkaline pretreatment and Fe dosing on batch anaerobic digestion of maize straw. *Applied Energy*, 158, 5564, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.045>.
- [15] M. Kamali, T. Gameiro, M.E. V Costa, I. Capela, Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes—An overview of the developments and improvement opportunities. *Chemical Engineering Journal*, 298, 162182, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.119>.
- [16] P.M. Thanh, B. Ketheesan, Z. Yan and D. Stuckey, Trace metal speciation and bioavailability in anaerobic digestion: A review. *Biotechnology Advances*, 34, 122136, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.006>.
- [17] M. Westerholm, B. Müller, S. Isaksson and A. Schnürer, Trace element and temperature effects on microbial communities and links to biogas digester performance at high ammonia levels. *Biotechnology for Biofuels*, 8, 154, 2015. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0328-6>.
- [18] M.S. Romero-Güiza, J. Vila, J. Mata-Alvarez, J.M. Chimenos and S. Astals, The role of additives on anaerobic digestion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 14861499, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094>.
- [19] C.M. Park and J.T. Novak, The effect of direct addition of iron (III) on anaerobic digestion efficiency and odor causing compounds. *Water Science & Technology*, 68, 23912396, 2013. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.507>.
- [20] L. Zhang, Y.W. Lee and D. Jahng, Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. *Bioresource Technology*, 102, 50485059, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.082>.
- [21] M. Garuti, M. Langone, C. Fabbri and S. Piccinini, Methodological approach for trace elements supplementation in anaerobic digestion: Experience from full-scale agricultural biogas plants. *Journal of Environmental Management*, 223, 348357, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.015>.
- [22] E.D. van Hullebusch, G. Guibaud, S. Simon, M. Lenz, S.S. Yekta, F.G. Feroso, R. Jain, L. Duyster, J. Roussel and E. Guillon, Methodological approaches for fractionation and speciation to estimate trace element bioavailability in engineered anaerobic digestion ecosystems: An overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46, 13241366, 2016. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1235943>.
- [23] J. Glass and V.J. Orphan, Trace metal requirements for microbial enzymes involved in the production and consumption of methane and nitrous oxide. *Frontiers in Microbiology*, 3, 61, 2012. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00061>.
- [24] F.G. Feroso, E. Van Hullebusch, G. Collins, J. Roussel, A.P. Mucha and G. Esposito, Trace Elements in Anaerobic Biotechnologies. IWA Publishing, 2019. <https://doi.org/10.2166/9781789060225>.
- [25] A. Karlsson, P. Einarsson, A. Schnürer, C. Sundberg, J. Ejlertsson and B.H. Svensson, Impact of trace element addition on degradation efficiency of volatile fatty acids, oleic acid and phenyl acetate and on microbial populations in a biogas digester. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 114, 446452, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2012.05.010>.
- [26] S. Rempel, E. Colucci, J.-W. de Gier, A. Guskov and D.J. Slotboom, Cysteine-mediated decyanation of vitamin B12 by the predicted membrane transporter BtuM. *Nature Communications*, 9, 18, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05441-9>.
- [27] B. Lee, J.-G. Park, W.-B. Shin, D.-J. Tian and H.B. Jun, Microbial communities change in an anaerobic digestion after application of microbial electrolysis cells. *Bioresource Technology*, 234, 273280, 2017.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.022>.
- [28] M. Ali and T.R. Sreerkrishnan, Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: A review. *Advances in Environmental Research*, 5, 175196, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(00\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00055-1).
- [29] Y. Liu, Y. Zhang, X. Quan, Y. Li, Z. Zhao, X. Meng and S. Chen, Optimization of anaerobic acidogenesis by adding Fe₀ powder to enhance anaerobic wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 192, 179185, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.044>.
- [30] Q. Guo, S. Majeed, R. Xu, K. Zhang, A. Kakade, A. Khan, F.Y. Hafeez, C. Mao, P. Liu and X. Li, Heavy metals interact with the microbial community and affect biogas production in anaerobic digestion: A review. *Journal of Environmental Management*, 240, 266272, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.104>.
- [31] L.-J. Wu, T. Kobayashi, H. Kuramochi, Y.Y. Li and K.Q. Xu, Effects of potassium, magnesium, zinc, and manganese addition on the anaerobic digestion of de-oiled grease trap waste. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 41, 24172427, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1879-3>.
- [32] B.H. Bashir and A. Matin, Sodium toxicity control by the use of magnesium in an anaerobic reactor. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 8, 1721, 2004. <https://doi.org/10.4314/jasem.v8i1.17220>.
- [33] F.G. Feroso, J. Bartacek, S. Jansen and P.N.L. Lens, Metal supplementation to UASB bioreactors: from cell-metal interactions to full-scale application. *Science of Total Environment*, 407, 36523667, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.043>.
- [34] B. Munk and M. Leubhn, Process diagnosis using methanogenic Archaea in maize-fed, trace element depleted fermenters. *Anaerobe*, 29, 2228, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2014.04.002>.
- [35] I. Worms, D.F. Simon, C.S. Hassler and K.J. Wilkinson, Bioavailability of trace metals to aquatic microorganisms: importance of chemical, biological and physical processes on biouptake. *Biochimie*, 88, 17211731, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.09.008>.
- [36] Z.W. and W.X. Cai Y., Hua B., Gao L., Hu Y., X. Yuan and Cui Z., Effects of adding trace elements on rice straw anaerobic mono-digestion: Focus on changes in microbial communities using high-throughput sequencing. *Bioresource Technology*, 239, 454463, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.071>.
- [37] H. Liu, J.Y. Zhu, S.Y. Fu, Effects of lignin– metal complexation on enzymatic hydrolysis of cellulose, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 72337238, 2010. <https://doi.org/10.1021/jf1001588>.
- [38] M. Stieb and B. Schink, Anaerobic oxidation of fatty acids by *Clostridium bryantii* sp. nov., a sporeforming, obligately syntrophic bacterium. *Archives of Microbiology*, 140, 387390, 1985. <https://doi.org/10.1007/BF00446983>.
- [39] M.H. Zandvoort, Trace metal dynamics in methanol fed anaerobic granular sludge bed reactors. ProQuest LLC, 789 East Eisenhower Parkway, 2005.
- [40] M. Kim, C.Y. Gomec, Y. Ahn and R.E. Speece, Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. *Environmental Technology*, 24, 11831190, 2003. <https://doi.org/10.1080/09593330309385659>.
- [41] B. Yu, Z. Lou, D. Zhang, A. Shan, H. Yuan, N. Zhu and K. Zhang, Variations of organic matters and microbial community in thermophilic anaerobic digestion of waste activated sludge with the addition of ferric salts. *Bioresource Technology*, 179, 291298, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.011>.
- [42] H.M. Ng, L.T. Sin, T.T. Tee, S.T. Bee, D. Hui, C.Y. Low and A.R. Rahmat, Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers. *Composites Part B: Engineering*, 75, 176200, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.008>.
- [43] L.G. Ljungdahl, The autotrophic pathway of acetate synthesis in acetogenic bacteria. *Annual Reviews Microbiology*, 40, 415450, 1986.
- [44] T.C. Harrop and P.K. Mascharak, Structural and spectroscopic models of the A-cluster of acetyl coenzyme a synthase/carbon monoxide dehydrogenase: Nature's Monsanto acetic acid catalyst. *Coordination Chemistry Reviews*, 249, 30073024, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2005.04.019>.
- [45] Y.Y. Choong, I. Norli, A.Z. Abdullah and M.F. Yhaya, Impacts of trace element supplementation on the performance of anaerobic digestion process: A critical review. *Bioresource Technology*, 209, 369379, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.028>.
- [46] P. Scherer, H. Lippert and G. Wolff, Composition of the major elements and trace elements of 10 methanogenic bacteria determined by inductively coupled plasma emission spectrometry. *Biological Trace Element Research*, 5, 149163, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF02916619>.
- [47] X. Meng, Y. Zhang, Q. Li and X. Quan, Adding Fe₀ powder to enhance the anaerobic conversion of propionate to acetate. *Biochemical Engineering Journal*, 73, 8085, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.02.004>.
- [48] M. Takashima, R.E. Speece and G.F. Parkin, Mineral requirements for methane fermentation. *Critical Reviews in Environmental Control*, 19, 465479, 1990. <https://doi.org/10.1080/10643389009388378>.
- [49] X. Zhu, Z. Wang, D. Yellezuome, R. Liu, X. Liu, C. Sun, M.H. Abd-Alla and A.-H.M. Rasmey, Effects of Trace Elements Supplementation on Methane Enhancement and Microbial Community Dynamics in Mesophilic Anaerobic Digestion of Food Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 14, 2323–2334, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-02024-0>.
- [50] A. Karlsson, X. Truong, J. Gustavsson, B.H. Svensson, F. Nilsson and J. Ejlertsson, Anaerobic treatment of activated sludge from Swedish pulp and paper mills–

- biogas production potential and limitations. *Environmental Technology*, 32, 1559–1571, 2011. <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.543932>.
- [51] D. Toprak, T. Yilmaz and D. Uçar, Increasing biomethane production from paper industry wastewater with optimum trace element supplementation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 2635–2648, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04156-1>.
- [52] H.M. Lo, C.F. Chiang, H.C. Tsao, T.Y. Pai, M.H. Liu, T.A. Kurniawan, K.P. Chao, C.T. Liou, K.C. Lin and C.Y. Chang, Effects of spiked metals on the MSW anaerobic digestion. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 30, 3248, 2012. <https://doi.org/10.1177/0734242X10383079>.
- [53] Y. Cai, Z. Zheng, Y. Zhao, Y. Zhang, S. Guo, Z. Cui and X. Wang, Effects of molybdenum, selenium and manganese supplementation on the performance of anaerobic digestion and the characteristics of bacterial community in acidogenic stage. *Bioresource Technology*, 266, 166175, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.061>.
- [54] C. Schmidt-Dannert and F.H. Arnold, Directed evolution of industrial enzymes. *Trends Biotechnology*, 17, 135136, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(98\)01283-9](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(98)01283-9).
- [55] J.G. Ferry, Fundamentals of methanogenic pathways that are key to the biomethanation of complex biomass., *Current Opinion in Biotechnology*, 22, 351357, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.04.011>.
- [56] V. Kapoor, X. Li, M. Elk, K. Chandran, C.A. Impellitteri and J.W. Santo Domingo, Impact of heavy metals on transcriptional and physiological activity of nitrifying bacteria. *Environmental Science Technology*, 49, 13454–13462, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02748>.
- [57] S. Bayr, O. Pakarinen, A. Korppoo, S. Liuksia, A. Väisänen, P. Kaparaju and J. Rintala, Effect of additives on process stability of mesophilic anaerobic monodigestion of pig slaughterhouse waste. *Bioresource Technology*, 120, 106113, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.009>.
- [58] D. Mara and N.J. Horan, *Handbook of water and wastewater microbiology*. Elsevier, London, 2003.
- [59] A. Hochheimer, R. Hedderich and R.K. Thauer, The formylmethanofuran dehydrogenase isoenzymes in *Methanobacterium wolfei* and *Methanobacterium thermoautotrophicum*: induction of the molybdenum isoenzyme by molybdate and constitutive synthesis of the tungsten isoenzyme. *Archives of Microbiology*, 170, 389393, 1998. <https://doi.org/10.1007/s002030050658>.
- [60] H.V.M. Hamelers, A. Ter Heijne, T.H.J.A. Sleutels, A.W. Jeremiasse, D.P. Strik and C.J.N. Buisman, New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 1673–1685, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2357-1>.
- [61] C.-E. Marcato, E. Pinelli, M. Cecchi, P. Winterton and M. Guiesse, Bioavailability of Cu and Zn in raw and anaerobically digested pig slurry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 15381544, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.12.010>.
- [62] M. He, G. Tian and X. Liang, Phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead during the aerobic composting of sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 671677, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.013>.
- [63] M.H. Zandvoort, E.D. van Hullebusch, F.G. Feroso and P.N.L. Lens, Trace metals in anaerobic granular sludge reactors: Bioavailability and dosing strategies. *Engineering in Life Science*, 6, 293301, 2006. <https://doi.org/10.1002/elsc.200620129>.
- [64] J. Gustavsson, S.S. Yekta, A. Karlsson, U. Skjellberg and B.H. Svensson, Potential bioavailability and chemical forms of Co and Ni in the biogas process—an evaluation based on sequential and acid volatile sulfide extractions. *Engineering in Life Science*, 13, 572579, 2013. <https://doi.org/10.1002/elsc.201200162>.
- [65] F.G. Feroso, J. Bartacek, R. Manzano, H.P. Van Leeuwen and P.N.L. Lens, Dosing of anaerobic granular sludge bioreactors with cobalt: impact of cobalt retention on methanogenic activity. *Bioresource Technology*, 101, 9429–9437, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.053>.
- [66] S. Myszograj, A. Stadnik and E. P. Koropczuk, The influence of trace elements on anaerobic digestion process. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 28, 105115, 2018. <https://doi.org/10.2478/ceer-2018-0054>.
- [67] S.S. Yekta, U. Skjellberg, Å. Danielsson, A. Björn and B.H. Svensson, Chemical speciation of sulfur and metals in biogas reactors—Implications for cobalt and nickel bio-uptake processes. *Journal of Hazardous Materials*, 324, 110116, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.058>.
- [68] W.P. Barber and D.C. Stuckey, Metal bioavailability and trivalent chromium removal in ABR. *Journal of Environmental Engineering*, 126, 649656, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339372\(2000\)126:7\(649\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339372(2000)126:7(649)).
- [69] F.G. Feroso, G. Collins, J. Bartacek, V. O’Flaherty and P. Lens, Role of nickel in high rate methanol degradation in anaerobic granular sludge bioreactors. *Biodegradation*, 19, 725737, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9177-3>.
- [70] X. Jin, X. Li, N. Zhao, I. Angelidaki and Y. Zhang, An innovative process for biogas upgrading by the microbial electrolysis cell. *Sustain-ATV Conference*, pp.1, Kgs. Lyngby, Denmark, 2016.
- [71] Y. Cai, L. Janke, X. Meng, Z. Zheng, X. Zhao, J. Pröter and F. Schäfer, The absolute concentration and bioavailability of trace elements: Two vital parameters affecting anaerobic digestion performance of chicken manure leachate. *Bioresource Technology*, 350, 126909, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126909>.

[72] X. Jiang, Q. Lyu, L. Bi, Y. Liu, Y. Xie, G. Ji, C. Huan, L. Xu and Z. Yan, Improvement of sewage sludge anaerobic digestion through synergistic effect combined trace elements enhancer with enzyme pretreatment and microbial community response. *Chemosphere*, 286, 131356, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131356>.

[73] O. Hijazi, E. Abdelsalam, M. Samer, B.M.A. Amer, I.H. Yacoub, M.A. Moselhy, Y.A. Attia and H. Bernhardt, Environmental impacts concerning the addition of trace metals in the process of biogas roduction from anaerobic digestion of slurry. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118593, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118593>





Konya Gençlik Merkezi karbon ayak izi Konya Youth Center carbon footprint

Mehmet Zahid Büyükcam^{1,*} , Fatma Bedük² 

^{1,2} Necmettin Erbakan Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya Türkiye

Öz

Karbon ayak izi, bir kişinin, kurumun veya ülkenin sürdürdüğü faaliyetler ve tükettiği ürünler sonucunda atmosfere salınan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) gibi sera gazlarının CO₂ cinsinden karşılığıdır. Bir başka ifadeyle insan faaliyetleri sonucu tüketilen enerjinin çevreye verdiği zararın bir ölçüsüdür. Enerji tüketimi sonucu verilen bu zararın azaltılabilmesi için şirketlerin, kurumların ve kişilerin karbon ayak izinin tespit edilmesi gerekir. Karbon ayak izi bir faaliyetin tonlarca CO₂ emisyonunu ölçmek, mümkün olan en düşük seviyeye indirmek önlemler almak ve girişimlerde bulunmak açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada Konya Gençlik Merkezi'nden kaynaklı toplam sera gazı miktarı hesaplanmaya çalışılmış ve 2022 yılına ait kurumsal karbon ayak izinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Konya Gençlik Merkezi'nin sera gazı emisyon kaynakları elektrik, doğalgaz, ulaşım kaynaklı yakıt (LPG, mazot, benzin) ve su tüketimidir. Emisyon hesaplamalarında Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından önerilen ve Tier yaklaşımlarıyla belirlenmiş olan metodoloji kullanılmıştır. Çalışmada doğalgaz kullanımından kaynaklı 45,63 ton (t) CO₂e, elektrik tüketiminden kaynaklı 22,5 tCO₂e ve araç kullanımından kaynaklı 13,43 tCO₂e tespit edilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre 2022 yılında Konya Gençlik Merkezi'nin atmosfere saldığı sera gazı emisyon miktarı 82,46 tCO₂e/yıl olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Emisyon, Gençlik merkezi, İklim değişikliği, Karbon ayak izi, Kurumsal, Sera gazı

1 Giriş

Dünya çapında insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, küresel iklim değişikliğine yol açmaktadır [1]. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), altıncı değerlendirme raporunda, insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının (GHG'ler) atmosferin, okyanusların ve karaların ısınmasına yol açtığı kesin olduğu belirtilmiştir. Bu sorunu hafifletmek için çoğu ülke, küresel ortalama sıcaklık artışını 2 °C'nin altında tutmayı ve sera gazı emisyonlarını 2030'a kadar yarıya indirmeyi kabul etmiştir [2].

Atmosferdeki sera gazları dünyayı ısıtan bir örtü vazifesini görmektedir. Ancak sanayi devriminden bu yana sera gazlarının oranının hızla artması dünyayı olması

Abstract

The carbon footprint is the CO₂ equivalent of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) released into the atmosphere as a result of the activities and consumption of a person, institution or country. In other words, the energy consumed as a result of human activities It is a measure of the damage it causes to the environment. In order to reduce this damage caused by energy consumption, It is necessary to determine the carbon footprint of companies, institutions and individuals. The carbon footprint is of great importance in terms of measuring the tons of CO₂ emissions of an activity, taking measures and taking initiatives to reduce it to the lowest possible level.. In this study, the total amount of greenhouse gas originating from Konya Youth Center was tried to be calculated and it was aimed to determine the institutional carbon footprint of 2022. The greenhouse gas emission sources of Konya Youth Center are electricity, natural gas, transportation fuel (LPG, diesel, gasoline) and water consumption. In emission calculations, recommended by the IPCC and Tier The methodology determined by the approaches was used. In the study, 45.63 tons of CO₂ e from natural gas use, 22.5 t CO₂ e from electricity consumption and 13.43 t CO₂ e from vehicle use were determined. According to the calculations, Konya Youth in 2022 The amount of greenhouse gas emissions released by the Center to the atmosphere was found to be 82.46 tons CO₂ e/year.

Keywords: Emission, Youth center, Climate change, Carbon footprint, Corporate, Greenhouse gas.

gerektiğinden çok ısıtmıştır. Bir sera gazının sera etkisine yaptığı katkı, ne kadar ısıyı soğurduğuna, ne kadarını yeniden yaydığına ve atmosferde ne kadar bulunduğu bağlıdır. Hem doğrudan hem de dolaylı olarak karbon ayak izine katkı veren gazlar metan (CH₄), azot monoksit (N₂O), hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler), kükürt hekzaflorür (SF₆) ve hepsinden önemlisi, en bol bulunan ve 1990'dan bu yana küresel ısınmaya en önemli katkı yapan karbondioksit (CO₂)'tir. Bu gazların emebileceği ve yeniden yayabileceği ısı miktarı açısından (küresel ısınma potansiyeli veya GWP olarak bilinir), CH₄, CO₂'den 23 kat, N₂O, CO₂'den 296 kat daha etkilidir. Bununla birlikte, Dünya atmosferinde CH₄ veya N₂O'dan çok daha fazla CO₂ vardır. 2021 için bu gazların küresel ortalama konsantrasyonu CO₂;

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: zahidbuyukcam@gmail.com (M. Z. Büyükcam)

Geliş / Recieved: 06.03.2023 Kabul / Accepted: 11.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1243783

415.7 ppm, CH₄; 1 908 ppb ve N₂O; 334.5 ppb'dir. Sonuç olarak, ölçülen atmosferik CO₂ konsantrasyonları, sanayi devrimi öncesi seviyelerden çok daha yüksektir. Halihazırda sera gazı emisyonlarının azaltılarak küresel sıcaklık artışının birkaç derece ile sınırlandırılmasına büyük önem verilmektedir [3,4].

Karbon ayak izi bir kişi veya kuruluşun atmosfere saldığı sera gazlarının CO₂ cinsinden karşılığı olarak adlandırılır. Sera gazlarının toplam değerinin hesaplanabilmesi için karbon dioksit eşdeğerleri (CO₂e) hesaplanır. Birim CO₂ cinsinden hesaplanan karbon ayak izi, bir kişinin veya bir kuruluşun ısınma, aydınlatma, pişirme, ulaşım, hayvancılık faaliyetleri ve endüstriyel süreçleri sonucu doğaya verdiği hasar olarak ifade edilebilir [5,6].

Küresel Ayak İzi Ağına göre şimdiye kadar karbon ayak izi büyümesi durdurulamamış ve 1961'den beri on bir kat artmıştır. Kişisel karbon ayak izi kişinin hareket etmesi, tüketmesi, yemesi/içmesi ve enerji gibi kaynakları kullanması sonucunda geride bıraktıklarıdır. Gezegendeki her bir kişinin her yıl ortalama dört ton CO₂ ürettiği tahmin edilirken, Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerde bu miktar kişi başına ve yılda dört katına kadar çıkmaktadır. 2050 yılına kadar kişisel olarak bireylerin karbon ayak izini yılda iki tonun altına düşürmesi gerektiği ifade edilmektedir. İnsanlar gibi şirketler, kurum ve kuruluşlar da üretim, nakliye ve enerji tüketimi sırasında sera gazı üretmektedirler. Kurumsal karbon ayak izi, doğrudan ve dolaylı olarak, şirketlerden kaynaklanan tüm sera gazı emisyonlarını kapsamaktadır. Bu bağlamda, şirketler genellikle karbon ayak izlerini azaltma veya dengeleme seçeneğine sahiptir. Fakat bir faaliyetin tonlarca CO₂ emisyonu ile ölçülen karbon ayak izini bilmek ve onu mümkün olan en düşük seviyeye indirmek hayli zordur. Karbon ayak izini azaltma seçeneğini kullanmak isteyen bir şirket veya kuruluş enerji verimliliklerini artırmalı, % 100 yenilenebilir kaynaklı enerji tüketmeli, farkındalık yaratmak için kampanyalar yürütmeli ve çevre projelerine yatırım yapmalıdır [7,8].

Bir kuruluşun karbon ayak izinin üç bileşeni vardır [1]:

Kapsam 1 emisyonları, bir kuruluşun kontrol ettiği veya sahip olduğu kaynaklardan kaynaklanan doğrudan sera gazı (GHG) emisyonlarıdır (örneğin, kazanlarda, fırınlarda, araçlarda yakıt yanmasıyla ilişkili emisyonlar).

Kapsam 2 emisyonları, elektrik, buhar, ısı veya soğutma satın alınmasıyla ilişkili dolaylı sera gazı emisyonlarıdır. Kapsam 2 emisyonları, üretildikleri tesiste fiziksel olarak meydana gelseler de kuruluşun enerji kullanımının bir sonucu oldukları için kuruluşun sera gazı envanterinde hesap edilmektedir.

Kapsam 3 emisyonları, raporlama yapan kuruluşun sahip olmadığı veya kontrol etmediği, ancak kuruluşun değer zincirinde dolaylı olarak etkilediği varlıklardan kaynaklanan faaliyetlerin sonucudur. Kapsam 3 emisyonları, bir kuruluşun kapsam 1 ve 2 sınırları içinde olmayan tüm kaynakları içermektedirler. (Örneğin ürün ulaşımı, çalışan iş seyahati ve çalışan işe gidip gelme) Kapsam 3 emisyonları, genellikle bir kuruluşun toplam sera gazı (GHG) emisyonlarının çoğunluğunu temsil etmektedirler.

Kurumsal karbon ayak izi hesaplama çalışmaları son yıllarda hızlıca artmıştır. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Bucak Sağlık Meslek Yüksekokulu'nda yapılan bir çalışmada doğalgaz, elektrik ve ulaşımından kaynaklı toplam karbon ayak izi hesaplanmış CO₂e salınımı 217.5 kg/yıl olarak tespit edilmiştir. Yine aynı çalışmada karbon salınımına en fazla katkı sağlayan faktörün ısınmadan kaynaklı doğalgaz tüketimi olduğu belirtilmiştir. Bu etkiyi azaltmak için yüksekokulun yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerji sistemlerine yönelmesi, ısı yalıtımının yapılması ve yüksek verimliliği olan klimaların kullanılması önerilmiştir [9].

Türkiye'nin nüfus bakımından en büyük şehirlerinden biri olan Bursa'nın en büyük ilçesi Osmangazi Belediyesi merkez hizmet binasına yönelik karbon ayak izi hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada 2014 ile 2017 yılları arasını kapsayan çalışmada kurumun toplam karbon salınımı 2 537 ton CO₂ olarak tespit edilmiştir. Yine karbon ayak izi miktarı bir önceki yıla göre sürekli olarak artış gösterdiğini teyit etmişlerdir. Çalışmada karbon ayak izini azaltmak için bazı önerilerde bulunulmuştur; personeli geri dönüşüme teşvik etmek, elektronik evrak kullanmak, suyu israf etmemek, suyun tekrar kullanılmasını sağlayan teknolojiler kullanmak, ısıtma ve soğutma giderlerini azaltmak, tasarruflu ampuller kullanmak, çevrimiçi toplantılar ile ulaşım kaynaklı yakıt tüketimini indirmek, düşük emisyonlu yakıtlı araçları tercih etmek, yalıtımla enerji kaybını engellemek ve yenilenebilir enerji sistemleri kullanmak [10].

Finlandiya'nın en büyük üniversitelerinden Oulu Üniversitesi'nde yapılan çalışmanın odak noktası kapsam 1 ve 2'nin yanı sıra, tüm ulaşım şekilleri ile iş seyahatleri ve konaklamalar, personel ve öğrencilerin işe gidiş gelişleri, restoran hizmetleri, eğitim, araştırma ve laboratuvarlar için ekipman alımı, atıkların işlenmesi ve kampüsteki binaların yönetimi olmak üzere kapsam 3 kategorisi seçilmiştir. 2019 yılında, üniversitenin emisyon envanterinin toplamı 19 t CO₂e olduğu ve en yüksek pay (%40), bölgesel ısıtmanın kullanılmasından kaynaklandığı bulunmuştur. Isıtmadan sonraki en yüksek pay (%22) kağıt, laboratuvar kimyasalları ve elektronik cihazlar ile mobilya ve büro malzemeleri gibi teğhizatın tedarikinden kaynaklı emisyonlar olduğu gösterilmiştir. Personel ve öğrencilerin üniversiteye gidiş gelişleri daha düşük bir paya sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışmada üniversitenin elektriği tamamen yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjiden dolayı elektrik tüketiminden kaynaklı emisyon sifıra eşittir. Ulaşımından kaynaklı karbon ayak izi azaltmak için daha çevre dostu işe gidip gelme uygulamaları ve kiralık arabaların yerine güncellenmiş seyahat yönergeleri önerilmiştir. Uzaktan çalışmanın veya çevrimiçi konferansların uygulanabilirliği sera gazı emisyonlarını azaltmak için iyi bir seçenek olarak görülmüştür. Yenilenebilir enerji açısından kampüs alanına güneş enerjisi sistemlerini yerleştirmesi önerilmiştir [11].

Kurumsal karbon ayak izi üzerine yapılan bir tez çalışmasında, büyükşehirlerde yaygınlaşan şehir hastanelerinin karbon ayak izlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. 4 pilot bölgedeki şehir hastanelerinde elde edilen kaynaklar kurumsal karbon ayak izini oluşturan bileşenlerin hepsi dikkate alınmıştır. Kapsam 1'i oluşturan kaynaklar jeneratör yakıt tüketimi, iş makinesi yakıt

tüketimi, soğutma sistemi akışkan dolumu, doğalgaz tüketimi ve kiralık araçlardaki yakıt tüketimidir. Kapsam 2 sadece elektrik tüketiminden kaynaklanmaktadır. Kapsam 3'ü oluşturan kaynaklar ise seyahat bilgileri, atıklar, personel servisleri ve ziyaretçi araçların kullanımınıdır. 2017-2019 yılları arasında yapılan araştırmada bir şehir hastanesi için en yüksek karbon ayak izi 192 ton CO₂e olarak tespit edilmiştir. Elektrik tüketimi kaynaklı oluşan karbon emisyonları çok fazla olduğundan dolayı kapsam 2'yi oluşturan kaynaklar en yüksek bulunmuştur. Karbon ayak izine en az katkıda bulunan kaynak hastane içerisinde oluşan atıklardan kaynaklı emisyonlar olduğu belirlenmiştir [12].

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi'nde yapılan bir tez çalışmasında Terzioğlu Kampüsü'nde oluşan kapsam 1 emisyonlarından kaynaklı (doğal gaz kullanımı ve rektörlüğe ait araç filosu) karbon ayak izi miktarı 2 052 ton CO₂e, kapsam 2 emisyonlarından kaynaklı (elektrik tüketimi) karbon ayak izi miktarı ise 4 649 ton CO₂e olarak hesaplanmıştır. Kapsam 3 emisyonlarından kaynaklı oluşan karbon ayak izi miktarı ise 3 421 ton CO₂e bulunmuştur. Bu sonuçlar baz alındığında Kapsam-2 dâhilinde yer alan elektrik tüketimi kampüste en yüksek karbon ayak izini oluşturduğu belirtilmiş bu emisyonları azaltmaya yönelik kampüs içerisinde enerji tasarruflu ampullerin kullanılması tavsiye edilmiştir. Yine kampüsün kendi elektriğini kendi üretmesi için güneş panelleri ve rüzgâr türbini gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önerilmiştir [13].

Bu çalışmada Konya Gençlik Merkezi'nden kaynaklı toplam sera gazı miktarı hesaplanmaya çalışılmış, kurumsal karbon ayak izinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Çalışma alanının sınırları

Bu çalışma Konya'nın en büyük ilçesi Selçuklu 'da yer alan Şekil 1'de gösterilen Konya Gençlik Merkezi'nde yapılmıştır. Konya Gençlik Merkezi 25.10.2013 tarihinde Dumlupınar Mahallesi mevkiinde Şekil 2'de gösterilen alana kurulmuş Gençlik ve Spor Bakanlığı'na bağlı bir kuruluştur.

Konya Gençlik Merkezi, Bakanlık politikalarına uygun olarak gençlerin fizik, moral güç ve yeteneklerini sağlayan beden eğitimi, oyun, ve spor faaliyetlerini sevk ve idare etmek; gençliğin boş zamanının değerlendirilmesine ilişkin hizmetleri yürütmek, bilgi ve beceri atölyeler düzenlemek, gençlerin kötü alışkanlıklardan korunması için gerekli tedbirleri almak amacıyla çalışmalar yürütmektedir [14].

Yapılan faaliyetler ve çalışan personellerin ulaşımı göz önüne alırsak Konya Gençlik Merkezi birden fazla sera gazı emisyonuna sahiptir.

2.2 Konya Gençlik Merkezi'nin sera gazı emisyon kaynakları

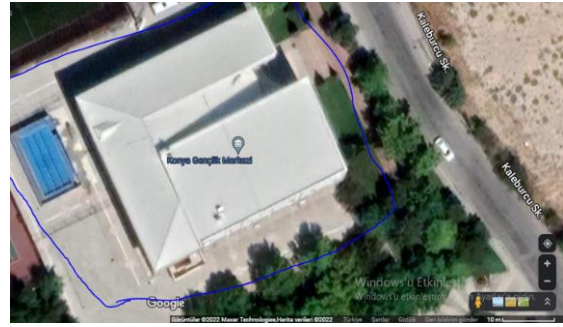
Konya Gençlik Merkezi'nin yıllık aktivitelere bağlı kurumsal karbon ayak izinin hesaplanması için kapsam 1, 2 ve 3'te yer alan aktiviteleri ele alınmıştır. Kuruluşun kapsam 1, 2 ve 3'de yer alan aktiviteleri şekilde gösterilmiştir (Şekil 3).

Konya Gençlik Merkezi'nde oluşan sera gazı emisyonları Şekil 4'te ifade edildiği gibi elektrik tüketiminden, doğalgaz

tüketiminden, ulaşım kaynaklı akaryakıt tüketiminden (mazot, benzin, LPG) ve su tüketiminden kaynaklıdır.



Şekil 1. Konya Gençlik Merkezi

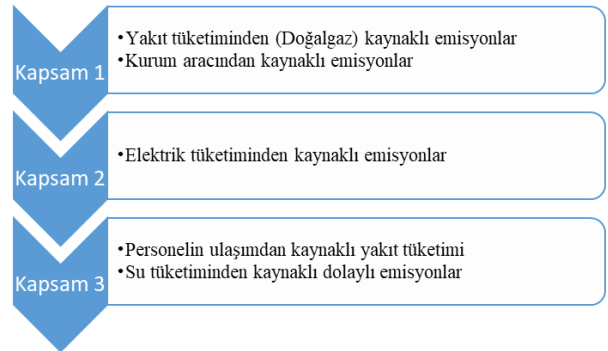


Şekil 2. Konya Gençlik Merkezi'nin sınırları

2.3 Verilerin toplanması

Konya Gençlik Merkezi karbon ayak izinin hesaplanması için kapsam 1, 2 ve 3 kapsamındaki faaliyetlere dair veriler toplanmıştır (Tablo 1).

Doğalgaz kullanımı, su tüketimi ve elektrik tüketimine ait veriler Gençlik Merkezi Müdürlüğü'nün aylık faturalarından kontrol edilmiştir (Tablo 2). Gençlik Merkezi'nde kullanılan transit aracın verileri de taşıt görev emri defterinden alınmıştır (Tablo 3). Yine personelin ulaşımından kaynaklı yakıt tüketimine ait veriler personelle yapılan anket sonucu oluşturulmuştur (Tablo 4).



Şekil 3. Konya Gençlik Merkezi'ne ait karbon ayak izi kaynakları

Tablo 1. Konya Gençlik Merkezi bilgileri

Personel Sayısı	13 Kişi
Personele Ait Araç Sayısı	10 Kişi
Personelin senelik çalışma günü sayısı	220 Gün
Kurumun günlük aktif olduğu saatler	24 Saat

Tablo 2. Konya Gençlik Merkezi'ne ait elektrik, doğalgaz ve su tüketim verileri

Ay	Elektrik Tüketimi (kwh)	Doğalgaz Tüketimi (m ³)	Su Tüketimi (m ³)
Ara.21	4933.32	2912	39
Oca.22	4276.5	5553	19
Şub.22	4822.86	4603	19
Mar.22	4684.8	3840	53
Nis.22	5126.4	1540	80
May.22	5015.94	270	60
Haz.22	3970.8	0	85
Tem.22	3888.6	0	15
Ağu.22	4543.68	0	62
Eyl.22	1529.34	0	75
Eki.22	4068.06	519	104
Kas.22	4278.24	2469	36
Genel Toplam	51138.54	21706	647

Tablo 3. Kurum aracı veriler

Aracın Motor Gücü	Yakıt Türü	Toplam km/yıl	Şehir İçi-Şehir Dışı Tüketim (100 km) L	Yıllık Harcanan Yakıt (L)
2.0	Dizel	25000	7.8	1950

Tablo 4. Personele ait ulaşım veriler

Personel	Ulaşım Türü	Yakıt Türü	Günlük Kat Edilen Mesafe (km)	Şehir İçi Yakıt Tüketimi, L (100 km)	Yıllık Harcanan Yakıt, L
1	Araba	LPG	17 km	9.8	366.52
2	Araba	Benzin	14 km	6.8	209.44
3	Araba	Dizel	10 km	6	132
4	Araba	Dizel	11 km	5.6	135.52
5	Araba	LPG	10 km	9	198
6	Araba	Dizel	12 km	5.2	137.28
7	Araba	Benzin	10 km	9.2	202.4
8	Araba	LPG	4 km	11	96.8
9	Otobüs	Dizel	14 km	38	1421.2
10	Yürüyüş Mesafesinde				
11	Araba	Benzin	22 km	9.6	464.64
12	Araba	Benzin	8 km	9.9	174.24
13	Otobüs	Dizel	4 km	38	334.4

2.4 Karbon ayak izi hesaplama yöntemleri

IPCC sera gazı emisyon envanterinin “Tier” olarak bilinen metodolojik bir yaklaşım ile hesaplanmasını göz önünde bulundurmıştır. Tier yaklaşımında üç farklı hesaplama yöntemi önerilmiştir [15].

Tier 1 temel yöntemdir,

Tier 2 - orta seviye

Tier 3 - karmaşıklık ve veri gereksinimleri açısından en zorlu olanıdır.

2. ve 3. Aşamalar bazen daha yüksek düzeyli yöntemler olarak adlandırılır ve genellikle daha doğru oldukları kabul edilir [16].

Tier 1 yaklaşımında IPCC kılavuzunda açıklanan emisyon faktörleri ve tüketilen yakıt miktarına göre hesaplanmaktadır. Tier 2 yaklaşımı temel olarak tier 1 yaklaşımı ile benzerliği vardır. Fakat emisyon faktörleri ülkeye göre değişiklik göstermektedir. Bu yöntemle hesap yapılırken ülkeye özgü emisyon faktörleri ve tüketilen yakıt miktarı göz önüne alınır. Tier 3 yönteminde ise daha kapsamlı ve spesifik bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Tier 3 metodolojisi yakma tesislerinin ısıl güçleri yakma teknolojisine göre belirlenmiş emisyon faktörleri gibi bilgileri içermektedir [17].

Bu çalışmada elde edilen tüketim verileri ve farklı unsurlar baz alınarak karbon ayak izi IPCC Tier 1 metoduyla ve daha detaylı hesaplamaya imkân tanıyan Tier 2 metodu ile eşitlik 1'deki formül kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır [17,18].

$$CF = AD \times EF \quad (1)$$

CF: Kirleticilerin karbondioksit cinsinden karbon ayak izi miktarı

AD: Faaliyet Verisi

EF: Emisyon Faktörü

3 Bulgular ve tartışma

Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımına göre CO₂ cinsinden yapılan hesaplama Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 başlıkları altında ifade edilmiştir.

3.1 Kapsam 1

Doğalgaz tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi yoğunluk, net kalorifik değer ve emisyon faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmış ve Tablo 5'te ifade edilmiştir.

Tablo 5. Konya Gençlik Merkezi 2022 yılı doğalgaz tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi

Doğalgaz Kullanımı	Birim	Miktar	Referans
Faaliyet Verisi	m ³	21 706	
Yoğunluk	kg/m ³	0,78	[19]
Net Kalorifik Değer	TJ /Gg	48	[18]
Emisyon Faktörü (EF)			
CO ₂ EF	kg	56 100	
CH ₄ EF	kg	1	[18]
N ₂ O EF	kg	0,1	
Emisyon			
CO ₂	t	45,59	
CH ₄	t	0,0008	
N ₂ O	t	0,00008	
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)			
CO ₂	tCO _{2e}	1	
CH ₄	tCO _{2e}	28	[20]
N ₂ O	tCO _{2e}	265	
Toplam Karbon Ayak İzi	tCO _{2e}	45,63	

Ülşan emisyonlar KIP ile çarpılarak eşdeğer t CO₂'ye dönüştürüldü.

Resmi Araç kullanımından kaynaklı karbon ayak izi yoğunluk, net kalorifik değer ve emisyon faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmış ve **Tablo 6**'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Konya Gençlik Merkezi 2022 yılı resmi araç kullanımından kaynaklı karbon ayak izi

Resmi Araç Kullanımı	Birim	Miktar	Referans
Faaliyet Verisi	L	1 950	
Yoğunluk	kg/L	0.83	[21]
Net Kalorifik Değer	TJ /Gg	43	[18]
Emisyon Faktörü (EF)			
CO ₂ EF	kg	74 100	
CH ₄ EF	kg	3.9	[18]
N ₂ O EF	kg	3.9	
Emisyon			
CO ₂	kg	5 157	
CH ₄	kg	0.27	
N ₂ O	kg	0.27	
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)			
CO ₂	tCO _{2e}	1	
CH ₄	tCO _{2e}	28	[20]
N ₂ O	tCO _{2e}	265	
Toplam Karbon Ayak İzi	tCO _{2e}	5.23	

Oluşan emisyonlar KIP ile çarpılarak eşdeğer t CO₂'ye dönüştürüldü.

3.2 Kapsam 2

Elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi yoğunluk, net kalorifik değer ve emisyon faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmış **Tablo 7**'de belirtilmiştir.

Tablo 7. Konya Gençlik Merkezi 2022 yılı elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi

Elektrik Tüketimi	Birim	Miktar	Referans
Faaliyet Verisi	kwh	51 138.54	
Yoğunluk	kg/L	0.83	[21]
Net Kalorifik Değer	TJ /Gg	43	[18]
Emisyon Faktörü (EF)			
CO ₂	t /MWh	0.44	[22]
Emisyon			
CO ₂	tCO _{2e}	22.5	
Toplam Karbon Ayak İzi	tCO _{2e}	22.5	

Oluşan emisyonlar KIP ile çarpılarak eşdeğer t CO₂'ye dönüştürüldü.

3.3 Kapsam 3

Otogaz tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi yoğunluk, net kalorifik değer ve emisyon faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmış **Tablo 8**'de belirtilmiştir.

Tablo 8. Konya Gençlik Merkezi 2022 yılı otogaz tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi

Otogaz Tüketimi	Birim	Miktar	Referans
Faaliyet Verisi	L	661,32	
Yoğunluk	kg/L	0,002477	[21]
Net Kalorifik Değer	TJ /Gg	46	[18]
Emisyon Faktörü (EF)			
CO ₂ EF	kg	63 100	
CH ₄ EF	kg	1	[18]
N ₂ O EF	kg	0,1	
Emisyon			
CO ₂	kg	4,88	
CH ₄	kg	0,000077	
N ₂ O	kg	0,000077	
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)			
CO ₂	tCO _{2e}	1	
CH ₄	tCO _{2e}	28	[20]
N ₂ O	tCO _{2e}	265	
Toplam Karbon Ayak İzi	tCO _{2e}	0,0048	

Oluşan emisyonlar KIP ile çarpılarak eşdeğer t CO₂'ye dönüştürüldü.

Motorin tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi yoğunluk, net kalorifik değer ve emisyon faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmış **Tablo 9**'da belirtilmiştir.

Tablo 9. Konya Gençlik Merkezi 2022 yılı motorin tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi

Motorin Tüketimi	Birim	Miktar	Referans
Faaliyet Verisi	L	2 160,4	
Yoğunluk	kg/L	0,83	[21]
Net Kalorifik Değer	TJ /Gg	43	[18]
Emisyon Faktörü (EF)			
CO ₂ EF	kg	74 100	
CH ₄ EF	kg	3,9	[18]
N ₂ O EF	kg	3,9	
Emisyon			
CO ₂	kg	5 713,45	
CH ₄	kg	0,3	
N ₂ O	kg	0,3	
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)			
CO ₂	tCO _{2e}	1	
CH ₄	tCO _{2e}	28	[20]
N ₂ O	tCO _{2e}	265	
Toplam Karbon Ayak İzi	tCO _{2e}	5,8	

Oluşan emisyonlar KIP ile çarpılarak eşdeğer t CO₂'ye dönüştürüldü.

Benzin tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi yoğunluk, net kalorifik değer ve emisyon faktörlerinin çarpılmasıyla hesaplanmış **Tablo 10** 'da belirtilmiştir.

Tablo 10. Konya Gençlik Merkezi 2022 yılı benzin tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi

Benzin Tüketimi	Birim	Miktar	Referans
Faaliyet Verisi	L	1 050.72	
Yoğunluk	kg/L	0.73	[21]
Net Kalorifik Değer	TJ /Gg	44.3	[18]
Emisyon Faktörü (EF)			
CO ₂ EF	kg	69 300	
CH ₄ EF	kg	25	[18]
N ₂ O EF	kg	8	
Emisyon			
CO ₂	kg	2 370.88	
CH ₄	kg	0.85	
N ₂ O	kg	0.27	
Küresel Isınma Potansiyeli (KIP)			
CO ₂	tCO _{2e}	1	
CH ₄	tCO _{2e}	28	[20]
N ₂ O	tCO _{2e}	265	
Toplam Karbon Ayak İzi	tCO _{2e}	2.4	

Oluşan emisyonlar KIP ile çarpılarak eşdeğer t CO₂'ye dönüştürüldü.

Su tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi su tüketim verileri ile emisyon faktörleri çarpılarak hesaplanmış **Tablo 11** 'de ifade edilmiştir. Emisyon faktörü diğerlerinden farklı olarak Defra, 2022 verileri kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 11. Konya Gençlik Merkezi 2022 yılı su tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi

Su Tüketimi	Birim	Miktar	Referans
Faaliyet Verisi	L	647 000	
Emisyon Faktörü			
CO ₂	kg	0.0014	[23]
Emisyon			
CO ₂	t	0.9	

4 Sonuçlar ve öneriler

Son zamanlarda, iklim değişikliği dünya genelinde dikkate alınması gereken en önemli konulardan biri haline gelmiştir. İklim değişikliğinin en büyük payı antropojenik faaliyetlerden kaynaklandığı herkes tarafından bilinmektedir. Karbon ayak izinin hesaplanması, emisyon azaltımına yönelik değerli ilk adımdır. Çünkü karbon ayak

izi hesaplanması kişinin, kuruluşun veya ülkenin küresel iklim değişikliğine karşı bir tepki olarak görülmektedir. Üniversiteler, okullar, kamu binaları, oteller ve hastaneler gibi farklı türdeki kuruluşlar günümüzde karbon ayak izi hesaplanmasında çaba göstermektedir. Karbon Ayak İzi, kuruluşların faaliyetlerinin çevre üzerindeki etkisini ölçmelerini ve iletmelerini sağlayan çok kullanışlı bir karar alma aracıdır [24].

Bu çalışmada Konya ilinde yer alan Gençlik ve Spor Bakanlığı'na bağlı Konya Gençlik Merkezi binasına ait CO₂ salınım miktarları belirlenmiş ve güncel personel sayısı esas alınarak karbon ayak izi hesabı yapılmıştır. Gerek bünyesinde çalışan personelden kaynaklı, gerekse Selçuklu İlçe Merkezinde görülen bir konumda olması sebebiyle çevreye olan etkileri bakımından önemli bir kuruluştur. Yapılan hesaplamalara göre 2022 yılında Konya Gençlik Merkezi'nin atmosfere saldırdığı sera gazı emisyon miktarı 82.46 ton CO_{2e}/yıl olarak bulunmuştur. Kurumsal karbon ayak izi çalışmalarına bakıldığında Gençlik Merkezi'nde hesaplanan karbon ayak izinin başka birçok kuruluşa kıyasla daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 12. Literatürdeki çalışmalar

Isınma Kaynaklı (tCO ₂)	Ulaşım Kaynaklı (tCO ₂)	Elektrik Tüketiminden Kaynaklı (tCO ₂)	Toplam Karbon Ayak İzi (tCO ₂)	Referans
104.8	52.2	60.5	217.5	[9]
91.2	193.6	373	657.8	[10]
18185	1636	43172	64213	[12]
1805.5	246.3	4649.2	6701	[13]
316.3	105.2	1777	2198.5	[25]

Sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacına bir yanıt olarak kuruluşlar, karbon ayak izlerini hesaba katmak için giderek daha fazla çaba harcamaktadır. **Tablo 12**'de belirtilen literatürdeki örnek çalışmaları kıyasladığımızda bu çalışmada hesaplanan karbon ayak izi miktarı daha düşüktür. Bunun sebebi Konya Gençlik Merkezinde enerji tüketimi minimum düzeyde olmasından kaynaklanmaktadır. Toplam karbon ayak izi bakımından çalışmamıza en yakın sonuçlar 217.5 tCO₂ ile Buca Sağlık Yüksekokulunda tespit edilmiştir. En uzak sonuçlar ise 64213 tCO₂ ile Şehir Hastaneleri üzerine yapılan çalışmada hesaplanmıştır. Isınmadan kaynaklı çalışmamıza en yakın sonuçlar 91.2 tCO₂ miktarı ile Osmangazi Belediyesi'nde hesaplanmıştır. Çalışmamızda en çok ısınmadan kaynaklı karbon ayak izi oluşmaktadır. **Tablo 11**'de yer alan çalışmalar baktığımızda elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi miktarı daha yüksektir.

Elektrik tüketimi toplam karbon ayak izine önemli bir katkı sağladığından, bu kuruluş enerji verimli teknolojilere ve enerji tasarrufuna yatırım yapabilir. Personelin Gençlik Merkezi'ne ulaşımında hibrid ya da elektrikli sistemle çalışan araçları tercih etmesi veya bireysel araçlar yerine toplu taşıma araçlarının kullanılması ulaşım kaynaklı emisyonları önemli düzeyde düşürecektir. Doğalgaz genellikle yandığında daha az CO₂ saldırdığı için hem kömür hem de

petrolden önce en temiz fosil yakıt olarak bilinir. Ancak kuruluştaki ısıtmadan kaynaklı doğalgaz tüketimi CO₂e emisyon miktarlarının artmasında en büyük etken olduğu tespit edilmiştir. Verimli ve sağlıklı bir ısıtma için doğalgaz brülörleri, kaloriferleri ve kombilerin gaz ayar ve kontrolleri yapılmalıdır. Yine bunun yanında baca gazı analizleri yapılmalıdır. Tüm bu işlemler sonucunda CO₂e emisyonlar düşecek ve ısı kayıpları azalacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

Kaynaklar

- [1] EPA, GHG Inventory Development Process & Guidance. <https://www.epa.gov/climateleadership/scope-3-inventory-guidance>, Accessed 18 December 2022.
- [2] A. Bolten, D.S. Kringos, I.J.B. Spijkerman, N.H. Sperna Weiland, The carbon footprint of the operating room related to infection prevention measures: a scoping review, *Journal of Hospital Infection*, 64-73, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2022.07.011>.
- [3] J. Thøgersen, P. Nørnberg, K. Finster, S.J.K. Jensen, Greenhouse gas capture by triboelectric charging. *Chemical Physics Letters*, 783, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139069>.
- [4] The British Geological Survey, The greenhouse effect. <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/how-does-the-greenhouse-effect-work/>, Accessed 18 December 2022.
- [5] K. Plassmann, G. Edwards-Jones, 15 – Carbon footprinting and carbon labelling of food products, *Environmental Assessment and Management in the Food Industry*, 272-296, 2010. <https://doi.org/10.1533/9780857090225.3.272>.
- [6] iklimBU, Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi (iklimBU). <http://climatechange.boun.edu.tr/karbon-ayakizi/>, Accessed 18 December, 2022.
- [7] İberdrola, What is the carbon footprint and why will reducing it help to combat climate change? <https://www.iberdrola.com/sustainability/carbon-footprint>, Accessed 18 December 2022.
- [8] The Nature Conservancy, Calculate Your Carbon Footprint. <https://www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/carbon-footprint-calculator/>, Accessed 18 December 2022.
- [9] K. Kumaş, A.İ. A. Akyüz, M. Zaman, A. Güngör, Sürdürülebilir bir çevre için karbon ayak izi tespiti. *El-Çezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 108-117, 2019. <https://doi.org/10.31202/ecjse.459478>.
- [10] R. B.Turan, Bursa Osmangazi Belediyesi Kurumsal Karbon Ayak İzi Hesabı ve İklim Değişikliği Uyum Çalışmaları. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 17-24, 2019. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/idec/issue/44131/468302>.
- [11] J. Kiehle, M. Kopsakangas-Savolainen, M. Hilli, E. Pongrácz, Carbon footprint at institutions of higher education: The case of the University of Oulu, *Journal of Environmental Management*, 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117056>.
- [12] M. Özyıldırım, Şehir hastanelerinin döngüsel ekonomi kapsamında enerji ve karbon ayak izlerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [13] G. Özçelik, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Terzioğlu Kampüsü'nün enerji ve karbon ayak izi açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [14] R.G, 2022-31847, Gençlik ve Spor Bakanlığı, Gençlik Merkezleri Yönetmeliği, 2022. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/05/20220526-2.htm>, Accessed 25 December, 2022.
- [15] H.A. Çelik, Konya İlinde Ulaşımın Kaynaklı Karbon Ayak İzi Ve Çevresel Fayda Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye 2020.
- [16] UNFCCC, Methodological Choice and Key Categories Analysis: 2006. https://unfccc.int/files/national_reports/non-annex_i_natcom/cge/application/pdf/3_key_categories_ps_lesotho_2016.pdf, Accessed 27 December 2022.
- [17] A. Karakoç, Yerel yönetimler için karbon ayak izinin hesaplanması; Kahramankazan örneği. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2022.
- [18] IPCC, "Energy. In 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, Accessed 17 December 2022.
- [19] Anonim, Çevre Mühendisleri Odası. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/10/20111027-5.htm>, Accessed 22 December 2022.
- [20] Global Warming Potential Values, Greenhouse Gas Protocol. https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf, Accessed 05 January 2023.
- [21] Enerji Kaynaklarının Ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik. <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=15437&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeli&mevzuatTertip=5>, Accessed 06 January 2023.
- [22] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü, 2022. <https://www.ikmib.org.tr/files/images/ebulten2/TR%20Elektrik%20Üretimi%20ve%20Tüketim%20Noktası%20Emisyon%20Faktörleri-ek.pdf>, Accessed 05 January 2023.
- [23] DEFRA, Government conversion factors for company reporting of greenhouse gas emissions. Department for Environment, Food & Rural Affairs -GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting>, Accessed 07 January 2023.







[24] M.G.G. Awanthi, C.M. Navaratne, Carbon Footprint of an Organization: a Tool for Monitoring Impacts on Global Warming. *Procedia Engineering*, 729-735, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.094>.

[25] M. Çerçi, İpcc Tier 1 Ve Defra Metodları İle Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi: Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.





Model tabanlı bir PV emülatör tasarımı ve gerçekleştirilmesi Design and implementation of a model-based PV emulator

Ardan Hüseyin Eşlik^{1,*} , Enes Yıldız² , İbrahim Güneş³  Kübra Kaysal^{4,*} ,
Mehmet Yalvaç⁵ , Said Mahmut Çınar⁶ 

^{1,2,3,4,5,6} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar Türkiye

Öz

Fotovoltaik (Photovoltaic – PV) panellerinin çıkış voltajı; ışınım, sıcaklık, gölgelenme gibi farklı birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu gibi faktörlerin çevresel şartlara bağlı olarak değişkenlik göstermesi nedeniyle PV panel testleri esnasında aynı çevresel şartların tekrar oluşturulması pek mümkün değildir. Ancak PV panel emülatörleri, belirli bir zaman dilimi için girdi olarak sunulan çevresel verileri kullanarak o dönemdeki şartları taklit edebilmektedirler. Gerçekleştirilen bu çalışmada, PV paneli üzerinde oluşabilecek kısmi gölgelenme etkilerinin modellenebildiği, model tabanlı bir PV paneli emülatörü oluşturulmuştur. Bu emülatör, toplamda 250W çıkış gücüne sahip olabilecek şekilde 3 adet 20'şer hücrelik ve kendi aralarında atlama diyotları ile bağlanmış durumda olan DC-DC (Direct Current - DC) dönüştürücüye ve 32 bitlik bir mikro-denetleyici kartına sahiptir. Emülatörün yazılımı Matlab Simulink modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan PV emülatörü, dört farklı gölgelenme kurgusuyla teste tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen veriler, gerçek PV panel çıktıları ve MATLAB/Simulink ortamında elde edilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, tüm gölgelenme durumları için 0.76'nın üzerinde r^2 skoru değeri elde edilmiş, deney ve simülasyon sonuçlarının oldukça yakın olduğunu ortaya konmuştur. Yüksek performansı ile emülatör, herhangi bir alanda, çatıda veya cephede kurulacak PV sistemlerinin teknolojik ve ekonomik fizibilite analizini kolaylaştırır.

Anahtar kelimeler: PV emülatörü, PV paneli, Kısmi gölgelenme, ARM mikro-denetleyici, Gömülü Sistemler

1 Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte insanoğlunun enerjiye olan talebi artarken, kullanılan enerji kaynakları da giderek azalmaktadır. Fosil yakıtların tükeniyor olması, aşırı maliyetleri ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle araştırmacılar, düşük maliyetli, yenilenebilir, temiz enerji kaynakları arayışına girmişlerdir [1]. Güneş enerjisi kaynağının sınırsız ve bedava olmasının yanında çevre dostu oluşu onu yenilenebilir enerji kaynakları arasında cazip hale getirmiştir [2,3]. Fotovoltaik enerji sistemleri, temelde yarı iletkenlerden yapılmış solar (Photovoltaic – PV) paneller ve güç devre elemanları sayesinde, güneş ışınımını elektrik

Abstract

Output voltage of Photovoltaic (PV) panels; It varies depending on many different factors such as radiation, temperature, shading. Since such factors vary depending on environmental conditions, it is not possible to re-establish the similar environmental conditions during PV panel tests. However, PV panels emulators can imitate the conditions of that period by using the environmental data presented as input for a certain time period. In this study, a model-based PV panel emulator was created to model the effects of partial shading that may occur on the PV panel. This emulator has a 32-bit microcontroller board and a DC-DC converter with 3 20 cells each, connected by jumper diodes, with a total output power of 250W. The software of the emulator was implemented using MATLAB Simulink models. The designed PV emulator has been tested with four different shading configurations. The data obtained at the end of the experiment were compared with the actual PV panel outputs and simulation results obtained on the MATLAB/Simulink environments. The comparison resulted in an r^2 score value above 0.76 for all shading cases, indicating that the experimental and simulation results are quite close. With its high performance, the emulator facilitates the technological and economic feasibility analysis of PV systems to be installed in any area, roof or facade.

Keywords: PV emulator, PV panel, Partial shading, ARM microcontroller, Embedded Systems

enerjisine dönüştürmektedir. PV panellerden üretilen enerji miktarı ise ışınım yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [4]. Güneşten gelen ışınım şiddeti doğrusal olmayan bir trende sahip olduğu için panellerden elde edilen akım ve gerilim değerleri de doğrusal bir yapıya sahip olmayacaktır. Buna bağlı olarak sistemin çıkışından elde edilen en yüksek güç değerine sistemin maksimum güç noktası (Maximum Power Point - MPP) denilmektedir [5,6]. PV panellerin çıkış gücünün maksimum seviyede elde edilebilmesi için literatüre katkısı bulunan çeşitli maksimum güç noktası takibi (Maximum Power Point Tracking - MPPT) algoritmaları ve DC baralar ile arayüz olarak kullanılan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: Ardanhuseyineslik@gmail.com. (A. H. Eşlik)
Geliş / Received: 02.02.2023 Kabul / Accepted: 06.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1246675

farklı tip dönüştürücüler tasarlanmıştır. DC/DC dönüştürücüler, PV emülatörlerindeki kontrol birimi tarafından üretilen referans gerilime uygun bir şekilde çalışarak, gerçek PV paneliyle aynı çıkışı oluşturmayı hedefler. Düşüren (buck), yükselten (boost) ve düşüren-yükselten (buck-boost) DC/DC dönüştürücüler PV emülatörlerde kullanılan çeşitli dönüştürücü topolojileridir [7-11].

Cordeiro ve arkadaşları [4], ışınım, sıcaklık ve yükteki ani değişikliklere hızlı cevap verebilecek buck-boost DC-DC dönüştürücüye dayanan bir sistem önermektedir. Önerilen sistem ile bir PV panelin I-V eğri simülasyonunu gerçekleştirmek, meteorolojik ve yük varyasyonlarını dikkate alarak farklı MPPT algoritmalarını değerlendirmek mümkün olmaktadır. Deneysel sonuçlar, sisteme uygulanan kayan kipli denetleyicinin etkinliğini ve iyi dinamiğini göstermiştir. Bir diğer çalışmada Saraswathi ve arkadaşları [12], yapay sinir ağı (Artificial Neural Network - ANN) ve parçalı doğrusallaştırma tekniği kullanarak hem düzgün ışınlanmış hem de kısmen gölgelenmiş PV panelleri taklit etme yeteneğine sahip bir fotovoltaik emülatör (Photovoltaik Emulator PVE) tasarlamıştır. Matlab/Simulink'te gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve donanım deneyleri, önerilen PVE'nin gerçek zamanlı uygulamasını onaylayarak kararlı durum doğruluğunu ve 10 ms içinde yerleşen geçici tepkiyi doğrulamıştır. Literatüre katkısı olan diğer bir çalışmada Boucharef ve arkadaşları [3], düşük maliyetli mikrodenetleyiciye dayalı bir güneş modülü emülatörünün deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Fotovoltaik emülasyonda iki kontrol strateji uygulanmaktadır. Bu kontrol stratejileri dijital oransal integral kontrolör (Proportional Integral - PI) ve bulanık mantık kontrolör (Fuzzy Logic Controller - FLC) yöntemleridir. Emülasyon sürecini değerlendirmek için istatistiksel nicel göstergeler kullanılmıştır. Sonuç olarak, MAE ve RMSE değerleri PI kontrolcüsüne göre FLC kontrolcüsünde daha düşük hesaplanmıştır. Wang ve arkadaşları [13], çalışmada hibrit tabanlı bir MPPT algoritmasına dayalı emülatör geliştirmişlerdir. Sonuçlar, geliştirilen algoritmanın güç kayıplarını azaltmada etkili olduğunu ve daha az salınım ile maksimum güç noktasının izlemede daha hızlı olduğunu göstermiştir. Bir diğer çalışmada Gürkan ve Aytav [14], tek diyotlu fotovoltaik panel emülatör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan emülatörün doğruluğunu test etmek için dijital ikiz oluşturulmuş, 10 W maksimum güç hedefi için, %0.1 hata ile 10.01 W maksimum güç elde edilmiştir. Ickilli ve arkadaşları [15], DC/DC dönüştürücü ve Alan Programlanabilir Kapı Dizilerine (FPGA) tabanlı yeni bir gerçek zamanlı PV emülatörü tasarlamışlardır. Deney sonuçlarında tasarlanan emülatörün çıktı özellikleri, çeşitli yükler ve çevre koşullarında gerçek fotovoltaik panelinkilerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir.

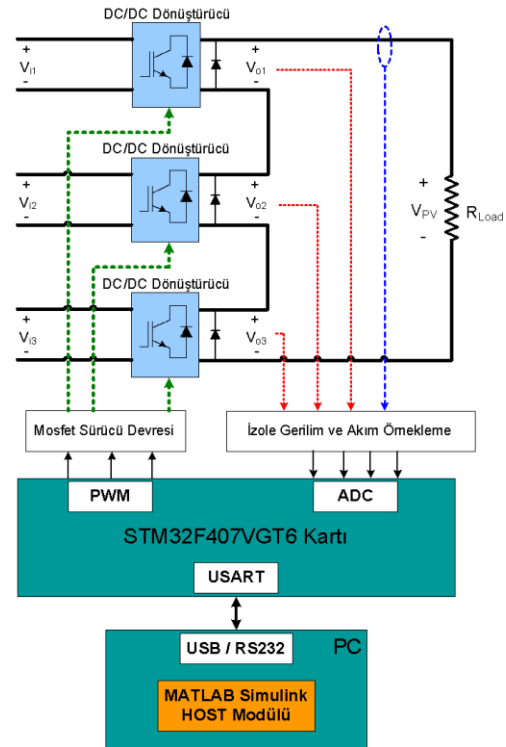
Bu çalışmada, fotovoltaik panellerin kısmi gölgelenmelerini modelleyen, model tabanlı bir PV emülatörü tasarlanmıştır. Tasarlanan emülatör 250W güce sahip DC/DC düşürücü dönüştürücüler kullanılarak modellenmiştir. Geliştirilen sistemin oluşturulmasında MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Böylelikle

klasik metin tabanlı programlamalarda yaşanan zorluklar ve problemlerin önüne geçilmiştir. Son olarak, emülatör kontrol birimi olarak 32-bitlik ARM tabanlı mikrodenetleyici kullanılmıştır.

Çalışmanın akışı şu şekildedir; tasarımı yapılan emülatörün yapısı, tasarım ayrıntıları, DC/DC dönüştürücü yapısı ve ayrıntıları, MATLAB/Simulink çalışmaları "Materyal ve Metot" başlığı altında, Emülatör – PV panel karşılaştırması sonucunda elde edilen performans ölçütü sonuçları "Bulgular ve Tartışma" başlığı altında ve son olarak çalışmanın deneysel sonuçları "Sonuçlar" başlığı altında sunulmuştur.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, birbirine seri bağlı durumda olan ve 250 W gücüne kadar çıkabilen üç hücre grubundan meydana gelen PV panellerini modelleyebilmek amacıyla bir PV emülatörü tasarlanmıştır. PV panel içerisinde yer alan üç hücre grubu için üç ayrı DC/DC düşürücü tipte dönüştürücü kullanılarak PV emülatörün kısmi gölgelenme durumlarını modelleyebilmesi sağlanmıştır. Gömülü yazılımı MATLAB/Simulink ortamında görsel olarak tasarlanan DC/DC bu dönüştürücülerin kontrolü için 32-bitlik ARM tabanlı bir mikrodenetleyiciden faydalanılmıştır. Emülatörden gerekli verileri toplayıp, DC/DC dönüştürücüler için referans gerilim değerini hesaplayan ve MATLAB/Simulink ortamında çalışan bir HOST modülü tasarlanmıştır. Tasarlanan bu PV emülatörünün blok şeması Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. PV emülatörüne ait blok şema

Emülatör, DC/DC dönüştürücüler, kontrol birimi ve MATLAB/Simulink ortamında koşulan HOST modülü şeklinde üç ana modülden meydana gelmektedir. Burada ki

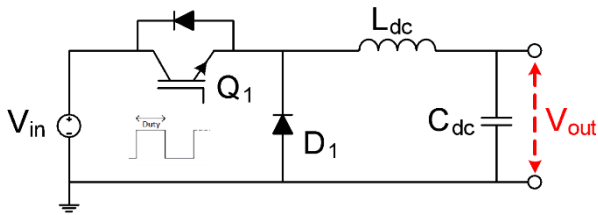
DC/DC dönüştürücüler, her bir hücre grubu için kontrol biriminden uygulanan PWM darbeleri ile DC gerilimleri üretmekle sorumludur. Kontrol birimi, DC/DC dönüştürücü gerilimlerinin ve çıkış akımının ölçümü, DC gerilim referansına uygun çıkış gerilimi üretimi için gerekli anahtarlama sinyallerinin üretimi ve HOST modülü ile veri alışverişi görevlerini yerine getirmektedir. HOST modülü, simüle edilmek istenen ısıtım ve sıcaklık koşulunda kontrol biriminden aktarılan akım bilgisi ile her bir hücre grubu için gerilim referans değerini hesaplayarak kontrol birimine iletmekle sorumludur.

Emülatörün ana yapısını oluşturan; “DC/DC Dönüştürücüler”, “Kontrol Birimi” ve “Host Modülü” başlıklar aşağıda ayrıntılarıyla sunulmuştur.

2.1 DC/DC dönüştürücüler

PV Emülatör devresinde seri bağlı üç hücre grubunu simüle edebilmesi için üç ayrı DC/DC düşürücü tipte dönüştürücü kullanılmıştır. Tasarlanacak DC/DC dönüştürücülerin giriş ve çıkış anma değerleri simüle edilmek istenen panel tiplerine uygun olarak belirlenmiştir. Seri bağlı her bir dönüştürücüden çekilecek maksimum çıkış akımı, simüle edilecek panelin kısa devre akım (Short Circuit Current - I_{SC}) değeri ile eşit olarak belirlenmiştir. Dönüştürücülerin maksimum çıkış gerilimi, panelin açık devre gerilim (Open Circuit Voltage - V_{OC}) değerinin üçte biri olarak belirlenmiştir. Dönüştürücülerin maksimum çıkış gücü, panelin maksimum güç değerinin üçte biri olarak belirlenmiştir. PV Emülatör ile simüle edilebilecek paneller dikkate alınarak DC/DC dönüştürücüler 16-24 VDC giriş geriliminde, 0-13 VDC çıkış gerilimi aralığında, maksimum 9 A çıkış akımı verebilecek şekilde tasarlanmıştır.

Şekil 2’de DC/DC düşürücü devresinin şematik diyagramı yer almaktadır. Dönüştürücüde yarı iletken anahtarlama elemanı olarak MOSFET’ten faydalanılmıştır. Bu anahtarlama elemanı 20 kHz’lik temel frekansa (f_{PWM}) sahip bir darbe genişlik modülasyonu (Pulse-Width Modulation - PWM) sinyaliyle kontrol edilmiştir.



Şekil 2. DC/DC düşürücü devresi

DC/DC düşürücü tipteki dönüştürücülerde çıkış gerilimi üzerinde yer alan salınım miktarını istenilen limitlerde tutabilmek için kullanılması gereken minimum bobin (L_{DC}) ve filtre kondansatörü (C_{DC}) değerleri sırasıyla aşağıdaki Denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

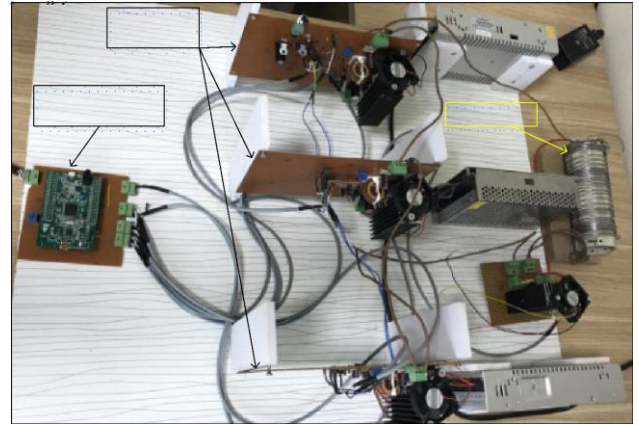
$$L \geq \frac{V_0}{\Delta I_L \cdot f_{PWM}} (1-D) \quad (1)$$

$$C \geq \frac{V_0}{\Delta V_0 \cdot 8 \cdot L \cdot f_{PWM}} (1-D) \quad (2)$$

Bu denklemlerde;

ΔI_L = Bobin akımının dalgalanma genliği ($I_{LMAX} - I_{LMIN}$), [A], ΔV_0 = yük/çıkış geriliminin dalgalanma genliği ($V_{0MAX} - V_{0MIN}$), [V], D = Doluluk oranını belirtmektedir.

DC/DC dönüştürücü filtre devre elemanlarının boyutlandırılmasından sonra baskı devre kartlarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Baskı devre kartı üzerinde MOSFET sürme devresi, akım ve gerilim örnekleme devreleri, filtre elemanları, yarı iletken anahtar ve bu anahtarı soğutma amacı ile kullanılacak soğutucu bloğu yer almaktadır. Soğutucu bloğu üzerinde oluşabilecek aşırı ısınma durumunu engellemek için fan kullanılarak zorlamalı hava soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’te montajı tamamlanmış PV emülatör dönüştürücü devreleri yer almaktadır.



Şekil 3. PV emülatörünün güç devresi

2.1.1 Kontrol birimi

PV emülatörünün kontrol biriminde, ST firmasına ait 32-bitlik STM32F407VGT6 tipi mikrodenetleyici içeren Discovery F4 geliştirme kartı kullanılmıştır. Geliştirme kartı üzerinde yer alan dört adet 12 bit çözünürlüğünde analog sayısal dönüştürücü (Analog Digital Converter -ADC) girişi kullanılarak üç ayrı DC/DC dönüştürücünün çıkış gerilimi ve yük akımı örneklenmiştir. Kontrol birimini güç dönüştürücüleri tarafından gelebilecek olası yüksek gerilim şokları ve gürültülere karşı koruma amacıyla tüm okumalar izole olarak gerçekleştirilmiştir. Gerilim örneklerini izole etmek için optik yalıtımlı ACPLC87 sensörleri, çıkış akım örneğini izole etmek için manyetik yalıtımlı ACS712 sensörü kullanılmıştır. Geliştirme kartında üretilen PWM darbeleri optik bağlayıcılar (optocoupler) kullanılarak DC/DC düşürücü yarı iletken anahtarlarına uygulanmıştır.

Geliştirme kartı içerisinde yer alan bu mikrodenetleyicinin gömülü durumdaki yazılımı, MATLAB/Simulink ortamında kod bilgisi gerektirmeden görsel olarak kullanılabilen, yine ST firması tarafından MATLAB kullanıcılarının hizmetine sunulmuş durumdaki MATLAB blok setlerinin kullanımı ile sağlanmıştır. Yazılımın tasarım süreci, ST firmasının CubeMX yazılımı

kullanılarak STM32F407VGT6 mikrodenetleyicisinde yer alan dahili kontrol birimlerinin ve çevre birimlerinin uygulamaya uygun olarak konfigüre edilmesiyle başlamıştır. CubeMX yazılımındaki tüm konfigürasyonlar yapıldıktan sonra Generate Code işlemi gerçekleştirilmiş ve Eclipse tabanlı IAR Embedded Workbench yazılımında gerekli proje dosyası oluşturulmuştur. CubeMX yazılımının ürettiği ioc dosyası MATLAB/Simulink projesine tanıtıldıktan sonra ön yapılandırılmaları tamamlanmış Mikrodenetleyici, Timer, ADC, PMW ve Haberleşme blokları modele eklenerek simülasyon modeli oluşturulmuştur. Her bir bloğa ait fonksiyonlar görsel olarak tanımlanarak tasarım süreci tamamlanmıştır. Tasarımı tamamlanan Simulink kontrol blok diyagramları MATLAB/Code Generator ile C kodlarına dönüştürülmüştür. MATLAB/Code Generator tarafından oluşturulan bu C kodları, uyumlu bir derleyici kullanılarak makine diline çevrilmiş ve mikrodenetleyici programlanmıştır. Mikrodenetleyici gömülü yazılımında seri haberleşme, örnekleme ve kontrol rutinleri, PWM üretimi ve veri kayıt süreçleri dört farklı sayaç ile tetiklenerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 4).

Kontrol birimi ile Host modülü arasındaki seri haberleşme işlemleri 100 Hz frekansta çalışan Timer1 sayacı ile tetiklenmiştir. Timer1 sayacının ürettiği her bir interrupt (kesme) döngüsünde kontrol biriminde örneklenen gerilim ve akım örnekleri Host modülüne iletilirken, Host modülünde hesaplanan gerilim referans değerleri kontrol birimi tarafından okunmaktadır.

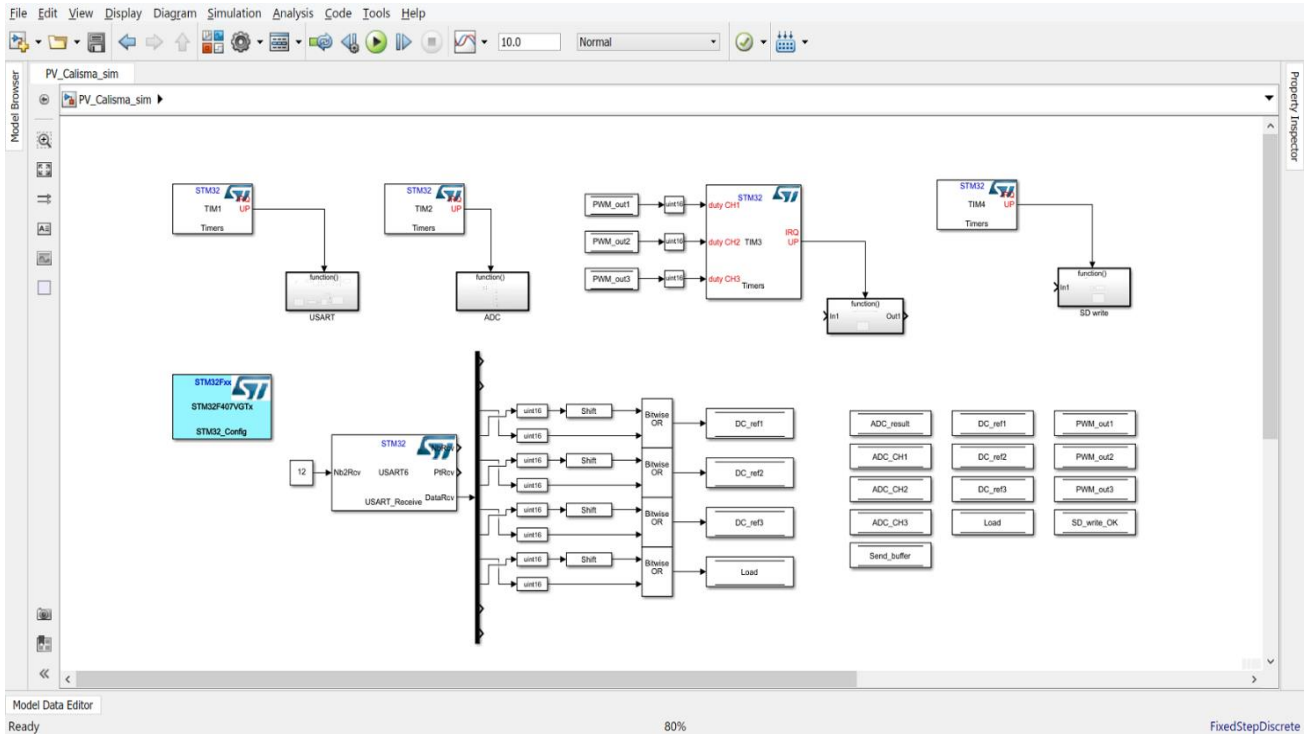
Mikrodenetleyici gömülü yazılımında örnekleme ve kontrol rutinlerini senkron olarak gerçekleştirebilmek için 1

kHz frekansa ayarlanmış Timer2 sayacı kullanılmıştır. Üç adet DC/DC dönüştürücü çıkış gerilimi ve PV çıkış akımını örnekleme için mikrodenetleyici ADC1 biriminde yer alan dört adet 12-bit çözünürlükte ADC girişi kullanılmıştır. Kullanılmış olan tüm sensörlerin off-set değerleri ile birlikte dönüştürme oranlarının da dikkate alındığı örneklenen veriler, gerçek değerlerine yakın bir biçimde ölçeklendirilmiştir.

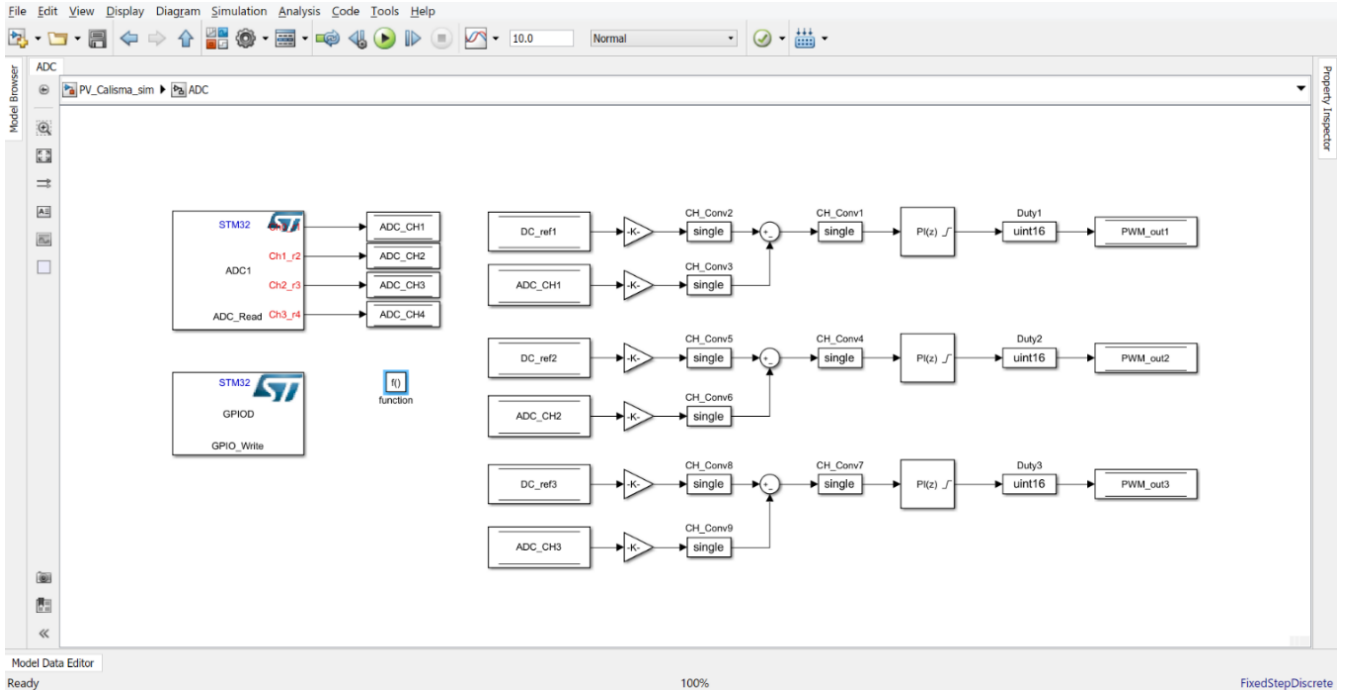
Her bir DC/DC dönüştürücünün çıkış gerilimleri örneklendikten sonra çıkış gerilimlerini istenen değerde regüle edebilmek için PI (oransal toplayıcı) tipi kontrolör yapısı kullanılmıştır. PI kontrolör katsayılarını hesaplamak için Matlab PIDTuner fonksiyonu kullanılmıştır. PIDTuner fonksiyonunda gerekli katsayıların hesaplanabilmesi için sürekli akım modunda çalışan DC/DC düşürücü dönüştürücünün transfer fonksiyonu Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$G(s) = \frac{V_0}{LC} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (3)$$

Her bir DC/DC dönüştürücü için referans çıkış gerilimi değeri ile örneklenen çıkış gerilimi arasındaki fark PI tipi kontrolör ile regüle edilerek ilgili dönüştürücün yarı iletken anahtarına uygulanacak PWM darbesinin doluluk oranı belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. DC/DC düşürücü devresi



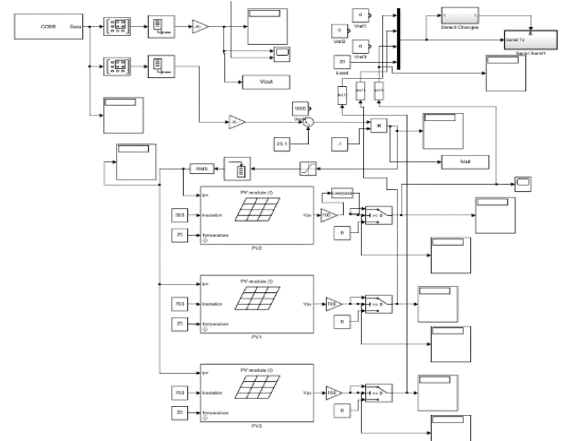
Şekil 5. MATLAB/Simulink Timer2 ADC ve kontrol rutinleri

Mikrodenetleyici gömülü yazılımında PWM darbeleri üretilebilmek için 20 kHz frekansa ayarlanmış Timer3 sayacı kullanılmıştır. Her bir DC/DC düşürücü devresi için Timer2 sayacının 1 kHz interrupt döngüsü içerisinde hesaplanan doluluk oranı değerleri Timer3 sayacının 16-bit çözünürlükteki doluluk oranı kaydedicilerine (register) yüklenerek 20 kHz anahtarlama frekansına sahip PWM darbeleri üretilmiştir. Üretilen PWM darbeleri optik bağlayıcılar ile DC/DC dönüştürücü devrelerinde yer alan MOSFET'leri sürerek her bir dönüştürücü çıkışında gerekli çıkış geriliminin üretilmesini sağlamıştır.

2.1.2 Host modülü

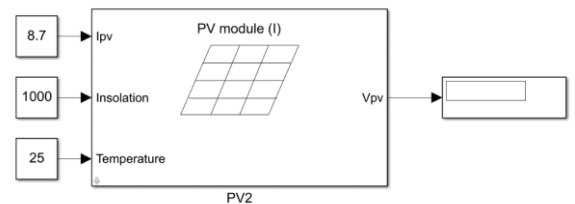
Matlab simulink ortamında tasarlanan host modülü ile emülatörün işleyeceği parametrik veriler tasarlanan PV modellere mikrodenetleyici üzerinden gönderilmektedir. Host modülü, girilen sıcaklık ve ışınım değerlerini kullanarak anlık referans gerilim çıktıları üretmektedir. Sıcaklık ve ışınım değerleri her bir seri bağlı hücre grubu için ayrı ayrı girilebilmektedir. Bu sayede panelin üzerine düşen güneş ışınımı gölgeleme oranlarının simule edilmesi sağlanabilmektedir. Matlab simulink ortamında oluşturulan host modülüne ait tasarım Şekil 6'da verilmiştir.

İlk olarak emülatörden seri haberleşme protokolü ile gelen akım değeri her bir seri bağlı hücre grubuna girdi olarak verilmektedir. Ardından simule edilmek istenen gölgeleme oranlarına bağlı olarak her bir hücre grubu için ışınım ve sıcaklık değerleri kullanıcı tarafından girilmektedir. Modülün stabilizesini arttırabilmek amacıyla her bir hücre grubunun çıkış değerine birer alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Filtre çıkışlarında elde edilen ondallıklı referans gerilimleri tam sayıya dönüştürülerek seri haberleşme modülüne aktarılmaktadır. Son olarak seri haberleşme protokolü üzerinden üretilen referans değerleri mikro denetleyiciye aktarılmaktadır.



Şekil 6. MATLAB/Simulink host modülü

Bu çalışmada güneş paneli, 3 adet seri bağlı hücre grubu ile temsil edilmiştir. Her bir hücre grubu ise Matlab PV modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan PV modeli Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. MATLAB/Simulink PV modülü

Şekil 7'de görülebileceği üzere PV modülünde 3 adet giriş 1 adet çıkış bulunmaktadır. Bu girişlerden Ipv değeri emülatörden gelen akım değerini, Ir ve t ise sırasıyla

kullanıcı tarafından girilen ışınım ve sıcaklık değerleri ifade etmektedir. Çıkış değeri olan V_{pv} ise PV modülü tarafından üretilen referans gerilimini ifade etmektedir.

Host modülünün çalıştırılmasıyla birlikte PV modül grupları ölçülen akım ve girişi gerçekleştirilmiş olan ışınım ve sıcaklık değerlerini kullanarak referans gerilim çıktıları üretmektedir. Ardından üretilen referans gerilim çıktıları kontrol birimine iletilmektedir. Modülün çalışması sırasında herhangi bir PV modülün girişi değerlerinde değişiklik gerçekleştirilmesi durumunda modül çıkışındaki referans gerilim değeri tekrar üretilmekte ve kontrol birimine gönderilmektedir. Dolayısıyla host modülünün çalıştırılmasından sonra farklı gölgelendirme durumları için girişler değiştirilerek farklı senaryoların oluşturulmasına imkân sağlanmıştır. Ayrıca, emülatör aracılığı ile elde edilen tüm çalışma noktası akım ve gerilim verileri belirli periyotlarda toplanıp Matlab Workspace ortamında kaydedilmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Emülatörün performansının araştırılabilmesi amacıyla belirli şartlar altında PV panelin davranışları incelenmiş ve aynı şartlarda emülatörün çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, farklı gölgelenme senaryoları oluşturularak bu senaryolar için birtakım testler gerçekleştirilmiştir.

Başlıkta ilk olarak gerçek PV panel ile yapılan test prosedürü aktarılacaktır. Ardından emülatör yardımıyla gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Son olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılarak istatistiki analiz sonuçları verilecektir.

3.1 PV panel test prosedürü

Kullanılan PV panelin gerçek ortamda, belirli ışınım altında ürettiği akım ve gerilim değerlerinin analiz edilmesi amacıyla bir takım testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler, Afyon Kocatepe Üniversitesi'nde yer alan "Güneş - Rüzgar Uygulama ve Araştırma Merkezi (GÜRAME)" yerleşkesinde yapılmıştır ve Solar Türk Enerji firmasına ait STR 60 M 265 modelli panel kullanılmıştır. Tablo 1'de kullanılan panelin karakteristik özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. Panelin karakteristik özellikleri

Özellik	Değer
<i>STO : 1000 W/m²; 25 °C; AM 1.5; Sinif A</i>	
Maksimum Güç (P_{max})	265.00 WP
Maksimum Gerilim (V_{max})	30.77 V
Maksimum Akım (I_{max})	8.63 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	37.85 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	9.24 A
Maksimum Sistem Gerilimi	1000 V

İlgili panelin I-V karakteristiğinin çıkartılabilmesi amacıyla 1000W gücünde bir reosta kullanılmıştır. Reosta yardımıyla panel kademeli olarak yüklenmiştir. Yükleme esnasında Fluke marka 190-204 model ölçü aleti kullanılarak belirli ışınım değerleri altında panelin ürettiği akım ve gerilim değerleri ölçülüp kaydedilmiştir. Panelin I-V karakteristiğinin çıkarılması amacıyla havanın açık ve güneşli olduğu bir gün seçilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Gölgeleme oranlarına göre 4 farklı senaryo kurgulanmıştır. Bu senaryolar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Gölgelemenin olmaması durumu (sıfır gölgelenme),
- Bir hücre grubunun %30'unun gölgelenmesi durumu,
- İki hücre grubunun ayrı ayrı %30 ve %40'ının gölgelenmesi durumu,
- İki hücre grubunun ayrı ayrı %30 ve %50'sinin gölgelenmesi durumu.

Arzu edilen senaryoların gerçekleştirilebilmesi amacıyla, hücre gruplarının belirli oranlarda üstü kapatılmıştır. Bu sayede gölgelenme durumlarının panele olan etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen bu değerler emülatörün performansı ile kıyaslanmıştır.

3.2 Emülatörün test prosedürü

PV paneller şebekeye genellikle dönüştürücü veya invertörler aracılığıyla bağlanmaktadır. Ancak invertör ve dönüştürücülerin doğrusal yük karakteristiğine sahip olmamaları nedeniyle bağlanan kaynaktan güç kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Çalışmamızda, doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu olumsuz etkileri devre dışı bırakabilmek amacıyla emülatör çıkışı bir direnç ile yüklenmiştir. Emülatörün performansının incelenebilmesi ve gerçek PV panel çıktılarıyla karşılaştırılabilmesi amacıyla, PV panel için gerçekleştirilen test senaryolarının aynıları emülatörde de gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kurgulanan her bir senaryo için PV panel testlerinin gerçekleştirildiği esnadaki ışınım ve sıcaklık değerleri host modülü kullanılarak emülatöre verilmiştir. Emülatörün, PV panelin yüklemesinde ve I-V karakteristiklerinin çıkartılmasında 1000W'lık reosta ve Fluke marka ölçüm cihazı kullanılmıştır. Senaryolardaki yüzdelik gölgelenme durumları, host modülünde yer alan ve seri bağlı hücre gruplarını temsil eden PV modüllerine girilen ışınım değerlerinin istenilen oranlarda düşürülmesiyle sağlanmıştır. Böylelikle PV modülünün test prosedürü esnasında oluşan farklı gölgelenme durumları simule edilebilmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak gölgelenmenin olmaması durumu incelenmiştir. Simülasyonun gerçekleştirilebilmesi için PV modülünün testi sırasında ölçülen ışınım ve modül sıcaklığı değerleri host modülünde yer alan üç PV modülüne de aynı şekilde uygulanmıştır. İkinci senaryoda yer alan %30 gölgelenme durumu için bir PV modülüne %30 daha az ışınım değeri girilmiş diğer iki PV modülünde ise ışınımlarda düşüş gerçekleştirilmemiştir. Üçüncü senaryoda ise 2 farklı hücre grubunda %30 ve %40'lık gölgelenme durumları bulunduğu için iki PV modülüne ışınım girişleri %30 ve %40'lık düşüşlerle uygulanmış, son kalan modülde herhangi bir ışınım düşüşü gerçekleştirilmemiştir. Son olarak dördüncü senaryoda ise, iki PV modülüne ışınım girişleri

%30 ve %50'lik düşüşlerle uygulanmış, diğer modülün ışınım değerine dokunulmamıştır.

Her bir senaryo için ışınım ve modül sıcaklıklarının girilmesinin ardından emülasyon deneyleri başlatılmaktadır. Deney başlangıcıyla birlikte host dosyasında yer alan sıcaklık ve ışınım verileri aygıt yazılımına gönderilmektedir. Ardından, aygıt yazılımı ise belirli zaman aralıklarında güç devresinden elde edilen çalışma noktası akımı ve gerilim bilgilerini host modülüne geri döndürmektedir. Senaryo süresince gerekli tüm ölçümlerin yapılmasının ardından veriler diskteki bir dosyaya kaydedilmektedir. Son olarak kaydedilen bu veriler MATLAB ortamında yorumlanarak görsel ve istatistikî analizler yapılmaktadır.

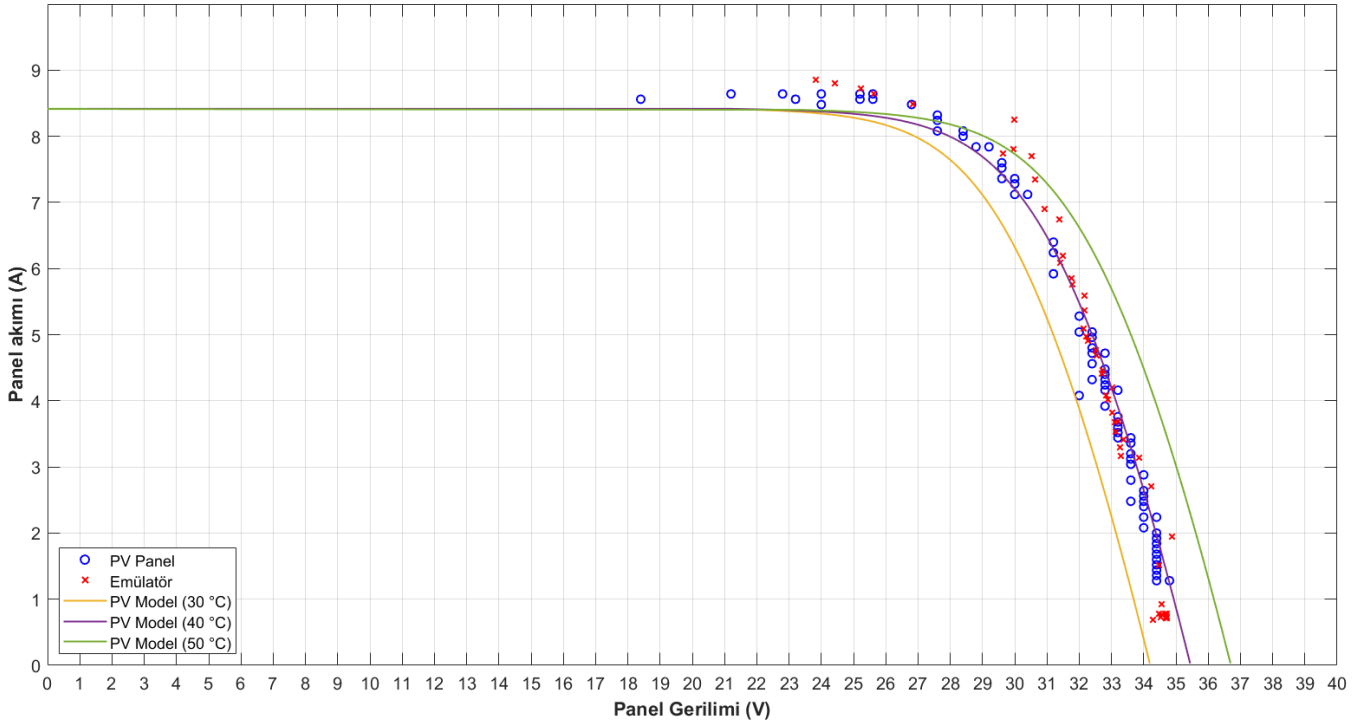
3.3 Elde edilen test sonuçları

Farklı gölgelenme oranlarına göre oluşturulan 4 farklı senaryo için PV panel ve emülatörden elde edilen sonuçlar bu bölümde aktarılmıştır. Bu kapsamda, birinci senaryo olan gölgelenmenin olmaması durumu (sıfır gölgelenme) için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak oluşturulan grafik Şekil 8'de verilmiştir.

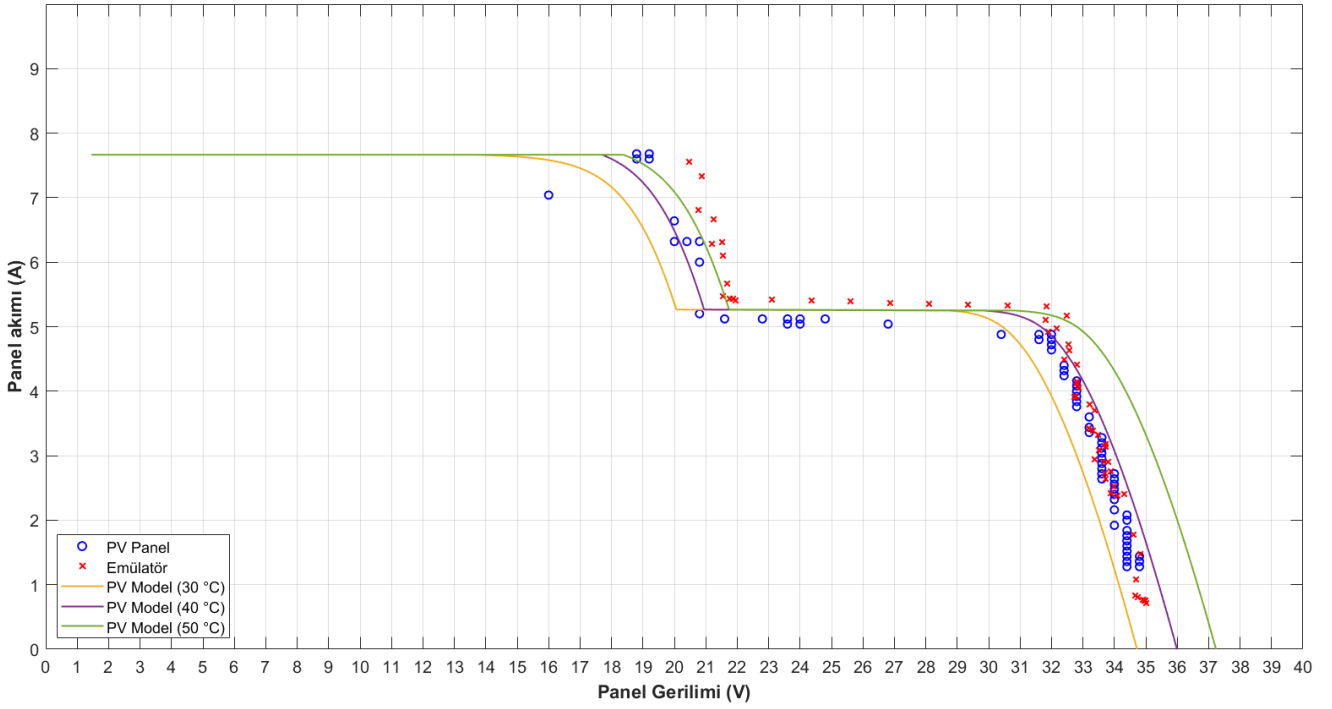
Grafikte yer alan mavi halkalar PV panel kullanılarak elde edilen akım ve gerilim değerlerini, kırmızı çarpılar ise emülatörden elde edilen akım ve gerilim değerlerini temsil etmektedir. Ayrıca, sırasıyla turuncu, mor ve yeşil renklerle gösterilen çizgiler ile Matlab PV modeli kullanılarak 30,40 ve 50 derecelik çalışma şartları için hesaplanmış akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Gölgenin bulunmadığı senaryo

için oluşturulan grafik incelendiğinde PV panel çıktılarıyla emülatör çıktılarının büyük oranda örtüştüğü görülebilmektedir. Ek olarak, PV panel kullanılarak gerçekleştirilen testler esnasında panel sıcaklığı 40 derece olarak ölçülmüş, emülatör testleri sırasında da sıcaklık değeri 40 derece olarak ayarlanmıştır. Bu bilgi ışığında grafik incelendiği takdirde, Matlab PV modelden 40 derece için elde edilen sonuçlarla PV panel ve emülatörden elde edilen sonuçların örtüştüğü görülebilmektedir. İkinci test senaryosu olan %30 gölgelenme durumu için elde edilen sonuçlardan oluşturulan grafik Şekil 9'da sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, PV panelin zaman içerisinde gerilim değeri azalırken akım değerinin arttığı görülebilmektedir. Panel geriliminin yaklaşık 32 V olduğu anlarda akım değeri 5 A civarlarında belirli bir süre kalmış, ardından yaklaşık 19V değerinde tekrar artışa geçerek 7.8 A civarlarında sabit kalmıştır. Emülatörden elde edilen gerilim ve akım değerleri incelendiğinde de PV panelin gerilim ve akımında yaşanan değişimleri emülatörün büyük oranda simüle edebildiği görülmektedir.

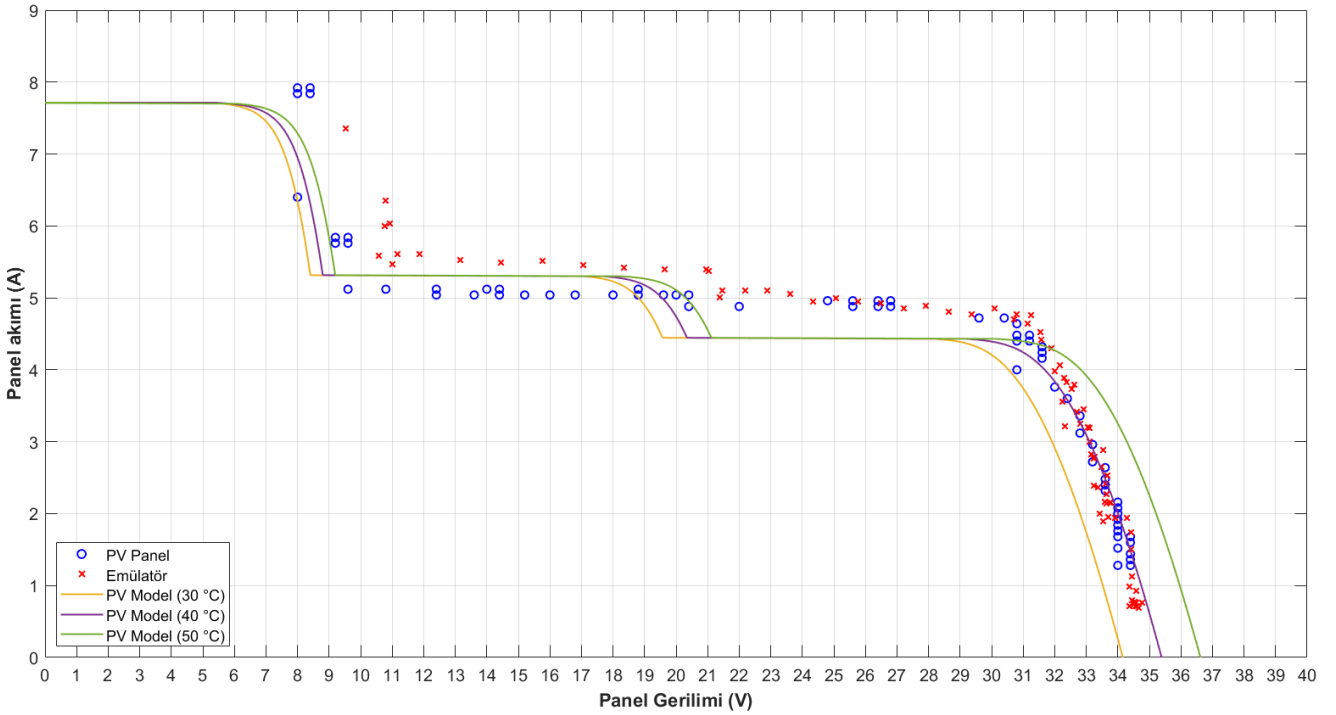
Bunun haricinde, emülatör sonuçlarının deney başlangıcında 40 derece için elde edilen PV model sonuçlarıyla örtüştüğü, ancak gerilimin yaklaşık 22V değerine geldiği andan itibaren birtakım uyumsuzlukların oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Üçüncü test senaryosu olan iki farklı hücre grubunun %30 ve %40 oranlarında gölgelenme durumu için elde edilen sonuçlardan oluşturulan grafik Şekil 10'da görülebilmektedir.



Şekil 8. Gölgesiz durum için farklı hücre sıcaklıklarında elde edilen değerlerin PV panel ile karşılaştırılması



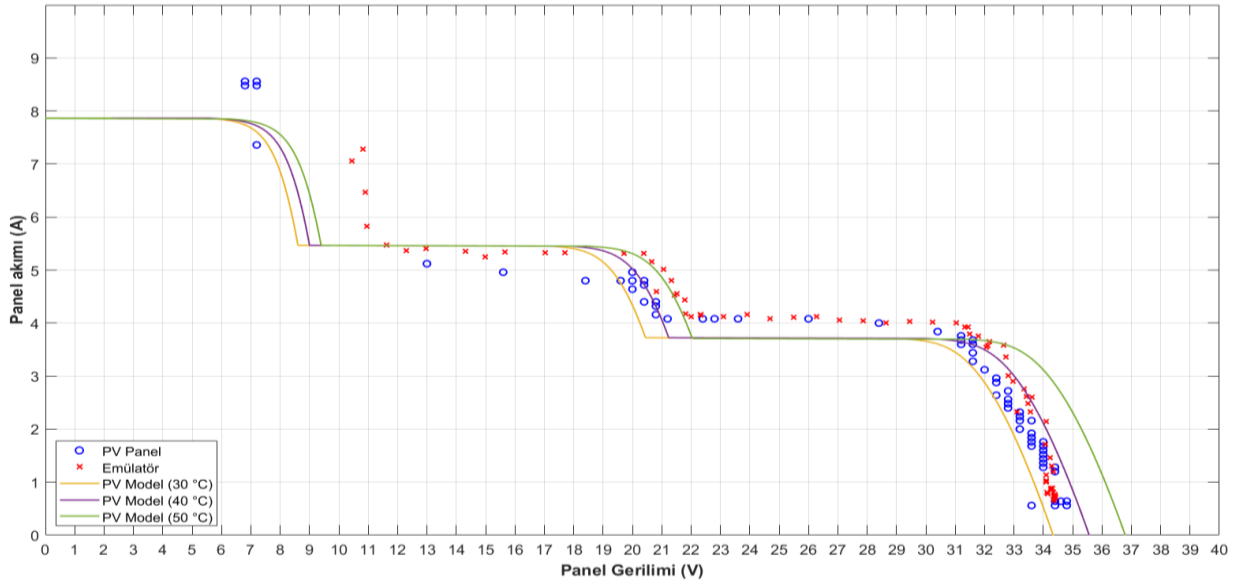
Şekil 9. Bir hücrenin %30 gölgeli olduğu durum için deneyin tekrarlanması



Şekil 10. Bir hücrenin %30 bir diğer hücrenin %40 gölgeli olduğu durum için deneyin tekrarlanması

Üçüncü test senaryosu için elde edilen grafik incelendiğinde, deney başlangıcı ile birlikte PV panel ve emülatörden elde edilen akım ve gerilim değerlerinin büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Ancak panel geriliminin yaklaşık 22V değerlerine gelmesinin ardından PV panel değerleri ile emülatörden alınan akım değerleri arasında yaklaşık 0.5 A'lık bir fark oluştuğu gözlenmektedir. Ayrıca, akım değerinin 5.5 A seviyesinin üstüne çıkmasıyla birlikte

gerilim değerleri arasında da yaklaşık 1V 'luk farkın oluştuğu görülmüştür. Ancak grafik incelendiğinde, bu küçük değerlerdeki hatalar dışında emülatörün farklı 2 hücre grubu için %30 ve %40'lık gölgelenme durumlarını başarılı bir şekilde simüle edebildiği görülmektedir. Son olarak, dördüncü test senaryosu olan %30 ve %50'lik gölgelenme durumları için elde edilen sonuçlardan oluşturulan grafik Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Bir hücrenin %30 bir diğer hücrenin %50 gölgeli olduğu durum için deneyin tekrarlanması

Dördüncü ve son test senaryosu için oluşturulan grafik incelendiğinde, senaryo iki ve üç’de yaklaşık 22V civarı ve sonrasında oluşan farklılıkların bu test senaryosunda da oluştuğu gözlenmiştir. Ancak PV panel akımının sabit kaldığı veya hızla yükseldiği bölümlerde emülatör akımının da aynı trendde sahip olduğu, emülatör gerilim ve akım değerlerinin PV panel gerilim ve akım değerleriyle büyük oranda örtüştüğü görülebilmektedir.

Son olarak, çalışma kapsamında oluşturulan PV emülatörüne ait çıktılar ile PV panel çıktıları literatürde sıklıkla kullanılan RMSE, MAPE ve r^2 performans ölçütleri kullanılarak farklı gölgelenme durumları için karşılaştırılmıştır. RMSE ve MAPE performans ölçütlerinin sıfıra, r^2 performans ölçütünün ise bir’e olabildiğince yakınlığı modelin başarısını göstermektedir. Gerçekleştirilen karşılaştırma sonucunda elde edilen RMSE, MAPE ve r^2 performans ölçütleri sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Emülatör-PV panel karşılaştırması sonucunda elde edilen performans ölçütü sonuçları

Gölgelenme Durumu	Parametre	RMSE	MAE	r^2
Gölgesiz	Gerilim	1.9028	1.1204	0.7660
	Akım	0.7064	0.6431	0.9546
%30 Gölgeli	Gerilim	2.5674	1.5661	0.9237
	Akım	0.7849	0.6070	0.9226
%30-%40 Gölgeli	Gerilim	7.6654	5.8684	0.7775
	Akım	1.3146	1.0633	0.8578
%30-%50 Gölgeli	Gerilim	4.0177	2.5143	0.9508
	Akım	1.5277	1.0870	0.8135

Tablo 2’de sunulan performans ölçütü sonuçları incelendiğinde akım ve gerilim parametrelerinde oldukça düşük RMSE ve MAPE değerleri elde edildiği, bununla birlikte tüm gölgelenme durumları için 0.76’nın üzerinde r^2 skoru’na ulaşılabilirdiği görülebilmektedir. Sonuç olarak tüm senaryolara ait çıktılar ve sonuçlar incelendiğinde, makale kapsamında geliştirilen ve kısmi gölgelenme etkilerini modelleyebilen PV emülatörünün PV paneli talep edilen kısmi gölgelenme koşullarında başarılı bir şekilde simüle edebileceğini göstermiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada kısmi gölgelenmenin etkilerini modelleyebilecek bir PV emülatörü tasarlanarak bu emülatörün farklı gölgelenme koşulları altındaki performansı analiz edilmiştir. Tasarlanan emülatör; 250 W çıkış gücüne sahip DC/DC dönüştürücü ve 32-bit mikrodenetleyici kontrol kartına sahiptir. Tasarlanan bu emülatörde kullanılan 32 bitlik ARM tabanlı mikrodenetleyicinin ve PV modelin görsel programlanması ile kontrol algoritmalarının oluşturulması için MATLAB/Simulink ortamı kullanılmıştır. Emülatörün performans testinin gerçekleştirilmesi amacıyla dört farklı gölgelenme senaryosu oluşturulmuş ve bu senaryolar için PV panel ve emülatörden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Performans testleri sonucunda, çalışma kapsamında oluşturulan emülatör, tüm gölgelenme durumları için 0.76’nın üzerinde r^2 performans ölçütü değerleri elde ederek gerçek bir PV modelini başarılı bir şekilde simüle edebileceğini göstermiştir. İleride gerçekleştirilecek çalışmalarda, farklı gölgelenme senaryoları kullanılarak geliştirilen bu emülatörün doğruluğunun ispatı için farklı tür ve etiket değerlerine sahip PV panellerinde emülatörün başarısının test edilmesi planlar arasındadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %7

Kaynaklar

- [1] A. Akgün ve A. Kırçay, PID ve kayan kipli kontrol kullanarak dc motor besleme amaçlı bir pv sistemin tasarlanması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 71-90, 2022. <https://doi.org/10.46578/humder.1411916>
- [2] A.I.M. Ali and H.R.A. Mohamed, Improved p&o mppt algorithm with efficient open-circuit voltage estimation for two-stage grid-integrated pv system under realistic solar radiation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137, 107805, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107805>
- [3] A. Boucharef, A. Tahri, F. Tahri, S. Silvestre and M. Bourahla, Solar module emulator based on a low-cost microcontroller. *Measurement*, 187, 110275, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110275>
- [4] A. Cordeiro, M. Chaves, P. Gâmbôa, F. Barata, P. Fonte, H. Lopes and J. Martins, Combining power electronic converters and automation to simulate solar pv systems. *7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies*, 2022. <https://doi.org/10.23919/SpliTech55088.2022.9854352>
- [5] O. Doğmuş, E. Kılıç, Ş. Sami ve M. Güneş, PSO algoritması ile optimize edilmiş pid denetleyicinin fotovoltaiik mppt sistemine uyarlanması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 1-8, 2017. <https://doi.org/10.17780/ksujes.362618>
- [6] G.A. Kumar, Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13(1), 77-103, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00399-9>
- [7] L. L. Carralero, F. F. Costa, A.P. Tahim, PV emulator based on a four-switch buck-boost dc-dc converter. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference*, 1-5, 2019. <https://doi.org/10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065364>
- [8] A. Kaysal, S. Köroğlu, Y. Oğuz, K. Kaysal, Design and experimental implementation of dc-dc converter based self-tuning fuzzy PI controller. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 483-495, 2023. <https://doi.org/10.17341/gazimfd.739775>
- [9] I. Moussa, A. Bouallegue, A.Khedher, New mppt algorithm modeling for photovoltaic emulator designed in fpga. *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems*, pp. 1-7, Hammamet, 23-25 March 2017. <https://doi.org/10.1109/GECS.2017.8066205>
- [10] M. Teke, A.S.M. Al-Arjeeli ve F. Korkmaz, PV sistemler için mppt kontrol cihazı tasarımı ve karşılaştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(1), 1-15, 2023. <https://doi.org/10.29137/umagd.1113630>
- [11] S. Samal, P.K. Barik, R.K. Soni and S. Nayak, Simulation and experimental investigation of a smart mppt based solar charge controller. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(3), 7748-7763, 2022. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2116507>
- [12] K.T. Saraswathi, P. Arumugam, G.V. Swaminathan and S. Periasamy, An artificial neural network-based comprehensive solar photovoltaic emulator. *International Journal of Photoenergy*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4741428>
- [13] Y. Wang, C. Yanarates and Z. Zhou, External current source-based unilluminated pv partial shading emulation system verified through the hybrid global search adaptive perturb and observe mppt algorithm. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.868951>
- [14] S. Gürkan ve E. Aytav, Fotovoltaiik panel emülatörü tasarımında dijital ikiz kullanımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(1), 194-206 2022. <https://doi.org/10.21597/jist.1008632>
- [15] D. Ickilli, H. Can, K.S. Parlak, Development of a fpga-based photovoltaic panel emulator based on a dc/dc converter. *38th IEEE photovoltaic specialists conference*, pp. 001417-001421, 2012. <https://doi.org/10.1109/PVS C.2012.6317863>





Derin öğrenme teknikleri ile elmada (Granny Smith) kusur tespiti

Defect detection in apple (Granny Smith) with deep learning techniques

Zeynep Ünal^{1,*}, Tefide Kızıldeniz², Mustafa Özden³, Hakan Aktaş⁴, Ömer Karagöz⁵

^{1,2}Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

³Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bitkisel Üretim ve Teknolojileri Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

⁴Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

⁵Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Elma (*Malus communis* L.) derimi sırasında ürünün kalitesini düşüren fiziksel zararlanmaların oluşması kaçınılmazdır. Zarar gören meyvelerin erken tespit edilerek ayrılması ticari değerinin artırılması açısından önemlidir. Tespit edilemeyen kusurlu ürünler sağlam ürünlerin kalitesini etkilediğinden dolayı gıda kaybının yanı sıra üretim hacmini de düşürmektedir. Çalışmanın amacı, “Granny Smith” elma çeşidinden alınan görüntüler üzerinde, derin öğrenme teknikleri kullanarak elmalarda kusur tespit etmektir. Özel koşul gerektirmeyen, uygun maliyetle sınıflandırma ve kusur tespiti yapacak bir teknik araştırılmıştır. Çalışmada, InceptionV3 modelinin 100 çevrim sonunda test doğruluğu %100, AlexNet modelinin ise test doğruluğu %98.33 elde edilmiştir. Derin öğrenme teknikleriyle, derim sırasında meyve üzerinde oluşan zararlar tespit edilerek ayrılmasıyla, derim sonrası oluşabilecek ekonomik kayıpların önüne geçebilecek bir yöntem geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: AlexNet, Kusur tespiti, Derin öğrenme, Elma sınıflandırması, Granny Smith, InceptionV3

1 Giriş

Son 60 yılda 12 kattan fazla artış gösteren elma üretimimiz, FAO'nun 2019 raporuna göre ülkemiz ilk sıralarda yer almaktadır. 2017 yılında Dünya genelinde üretilen 83 milyon ton elmanın 3.62 milyon tonu Türkiye’de üretilerek elma üreticileri sıralamasında Türkiye, Çin ve ABD’den sonra üçüncü sırada yer almıştır. Elma üretim alanı bakımından ise Türkiye, Çin, Hindistan ve Rusya’dan sonra dördüncü sırada yer almaktadır [1]. Dünya pazarlarında yer edinebilmek için pazarın isteklerine uygun kalitede ürün elde edilmelidir. Yaş meyve ve sebze üretimi, tür ve çeşitlere göre değişmekle birlikte üreticiden tüketiciye ulaşmaya kadar ürün kaybının %30’a ulaştığı ve bu oranın %22’nin ise hasat ve depolama esnasındaki kayıplardan olduğu tahmin edilmektedir [2]. Elma deriminde ve derim sonrası aşamalarda görülen fiziksel etkiler sonucu oluşan yara, bere

Abstract

During apple (*Malus communis* L.) harvesting, physical damage that reduces the quality of the product is inevitable. Early detection and separation of damaged fruits is important in terms of increasing their commercial value. Undetected defective products reduce the production volume as well as food loss, since they affect the quality of intact products. The aim of this study is to detect defects in apples using deep learning techniques on images taken from the “Granny Smith” apple cultivar. A technique that does not require special conditions and that will make classification and defect detection cost-effectively has been researched. In the study, the test accuracy of the InceptionV3 model was 100% after 100 epochs, and the test accuracy of the AlexNet model was 98.33%. A method has been developed that can prevent economic losses that may occur after harvesting by detecting and separating the damages that occur on the fruit during harvesting with deep learning techniques.

Keywords: AlexNet, Apple classification, Bruise detection, Deep learning, Granny Smith, InceptionV3

ve ezikler, çürümelere ve ağırlık kayıplarına neden olmaktadır. Fiziksel yaralanmalardan sonra yaklaşık olarak birkaç saat içinde fenolik maddelerin oksidasyonu sonucu renk bozulması başlamaktadır. Zarar görmüş meyvelerin depolama sırasında çürüme oranı %25 iken, zarar görmemiş meyvelerde ise %1.3 olduğu bilinmektedir [3]. Bu çürümelere özellikle hasat öncesi ve sonrasında meyve yüzeyinde meydana gelmiş fiziksel yaralanmalardaki latent enfeksiyonlardan kaynaklanmaktadır [4]. Meyve çürümesi, meyvenin piyasaya gönderilmeden önce derecelendirilmesinde önemli bir kalite indeksidir [5]. Bahçede veya paketleme evlerinde kayıpların nedenleri sıralandığında ilk sırada seçme, boylamadaki başarısızlık gelmektedir [2]. Bu nedenle depolara gönderilen ürünün sistematik bir şekilde ayıklanarak yerleştirilmesi, mevcut depolama kapasitesini verimli kullanılmasını sağlayacak, aynı zamanda depolama sırasındaki kayıpları azaltacaktır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: zeynepunal@ohu.edu.tr (Z. Ünal)

Geliş / Received: 15.02.2023 Kabul / Accepted: 13.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1250012

Elmada fiziksel zarar tespiti konusunda literatürde çok sayıda çalışma vardır. En yaygın olarak kullanılan yöntem, görüntüleme sistemine dayalı yapay görme (makine vizyonu) tekniğidir. Araştırmacılar, farklı görüntüleme teknikleri kullanarak meyvelerdeki zararlanma seviyelerini erken tespit etmeye yönelik araştırmalar yürütmüşlerdir. Bu araştırmalarda biyobenek görüntüleme [6], floresan görüntüleme [7], yapısal aydınlatma-yansıma görüntüleme [8], hiperspektral veya multispektral görüntüleme [9], [10], [11], X-ışını görüntüleme [12], manyetik rezonans görüntüleme ve termal görüntüleme [13], [14] gibi görüntüleme tekniklerini yapay görme ile entegre ederek fiziksel zararlanma seviyelerini belirlemeye çalışmışlardır [15]. Bu çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla yüksek maliyetli görüntüleme sistemlerinin kullanıldığı görülmektedir ancak bu gerçek zamanlı uygulama, laboratuvar ortamında olup, ortam ışıklandırmasından etkilendiğinden dolayı ticari amaçlı kullanılması için yeterli bulunmamıştır. [15]. Işık gerektirmeyen tekniklerden biri ise termal görüntüleme tekniği olup, performans ve hız açısından uygun olsa bile ortam sıcaklığından etkilenmesi, ticari kullanımının önünde bir engel oluşturmaktadır [16]. Floresan görüntüleme tekniği ise klorofil içeren meyvelerin kullanımı için uygundur ancak meyvenin gelişme oranına göre farklı klorofil miktarı içermesi, uygulamayı etkilemektedir [15]. X-ray görüntülemenin pahalı olmasının yanında radyasyon yaydığından tarım uygulamaları için elverişli değildir [12]. Bu nedenle düşük maliyetli yeni elma sınıflandırma sisteminin tasarlanması, değerli bir araştırma konusu olarak ortaya çıkmaktadır.

Ülkemizin sahip olduğu iklim koşullarından dolayı elmanın anavatanı olması sebebiyle, Türkiye’de birçok elma çeşidinin yetiştiriciliği yapılmaktadır. Elma üretimimizin %53.22’sini “Starking Delicious”, %28.00’ini “Golden Delicious”, %7.99’ünü “Amasya”, %1.89’ünü “Granny Smith” ve %8.90’ını diğer çeşitler oluşturmaktadır. Türkiye’de ve Dünyada üretilen elma çeşitleri dikkate alındığında elma meyvesinde hasar tespiti yapılan çalışmalar, Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Zararlanmaları tespit etmek için yapılan çalışmalar

Elma Çeşitleri	Çalışmalar
Red Delicious	[6], [16], [17], [18], [19]
Fuji	[20], [21], [22], [16], [23], [24]
Jonagold	[25], [26], [12], [27], [28], [29], [30], [31], [10]
Golden Delicious	[32], [33], [7], [34], [35], [36], [37], [13], [38], [39], [40]
Royal Gala	[36], [37]
Pink Lady	[32]
Joly Red	[12], [31]
Champion	[38], [40]
Macintosh	[16]
Granny Smith	[39], [41], [42], [43]

Literatürdeki çalışmalar elma çeşitleri açısından değerlendirildiğinde, tek renk olması sebebiyle fiziksel

zararlanmaların tespitinde, kendine has çeşit özelliklerinden dolayı kısmen daha kolay tespit edilen “Golden Delicious” çeşidi oldukça fazla çalışılmıştır [35]. Birden fazla renk içeren “Jonagold” ve “Fuji” gibi çeşitlerde başarı oranını artırmak için yapay zekâ tekniklerinden k-NN, Fuzzy k-NN, SVM ve C4.5 gibi tekniklerden yararlanılmıştır. Son yıllarda birçok alanda başarı ile uygulanan derin öğrenme teknikleri, “Jonagold” ve “Fuji” elma çeşitlerinde fiziksel zarar veya kusur tespit etme uygulamalarında başarılı bir şekilde uygulandığı görülmüştür [26]. Dünyada önemli çeşitlerden birisi olan ve ülkemizde de üretiminin artması beklenen “Granny Smith” çeşidini [3] konu alan çalışmaların yetersiz olduğu görülmektedir. “Granny Smith” tek renkli olması sebebiyle “Golden Delicious”a benzer bir şekilde sınıflanabileceği varsayılmaktadır ancak “Granny Smith”in sert dokusu olması sebebiyle zarar görmüş dokudaki renk değişimi “Golden Delicious” çeşidine göre nispeten daha az olduğundan [44] ayıklama algoritmasında uygulanacak görüntü işleme tekniklerinin uygulanmasını zorlaştırmıştır

Son yıllarda görüntüler içerisindeki renk, desen, şekil gibi birçok özellik, herhangi bir ön işleme gereksinim duymadan anlamlandırılan derin öğrenme tekniği, elma dokusundaki zararlanmaları tespit etme için başarıyla uygulanabilmiştir.

En popüler derin öğrenme ağlarından biri Evrişimli Sinir Ağlarıdır (ESA) [45]. RGB görüntüleri ile eğitilen ESA, elmalarda gözle görülür kusurların tespitinde başarıyla uygulanmıştır. Fan vd. [24] ESA kullanarak ‘Fuji’ elma çeşidinde görünen kusurlar tespit etmişlerdir. We vd. [46] ESA mimari yapılarından biri olan AlexNet modelini kullanarak, ‘Aksu Fuji’ elma çeşidinin de kusurları sınıflandırmıştır. Kumar vd. [47] elmaları kalitesine göre sınıflandırmıştır. Stasenkov vd. [48] hasat sonrası zararlanmaları U-Net, Deeplab, and Mask R-CNN mimari yapıları kullanarak sınıflandırmıştır. Xin vd. [49] YOLOv3 mimari yapısını kullanarak zararlanma tespiti yapmışlardır. Xue vd. [50] GoogLeNet mimari yapısını kullanarak, Ayaz vd. [51] ise ResNet, SqueezeNet, and MiniVGGNet mimari yapısını kullanarak elma kusurlarını tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, “Granny Smith” elma çeşidinde, RGB kamera ile alınan görüntüler ESA eğitilerek kullanılarak, bunun sonucunda elmaların zararlanmış veya sağlam şeklinde sınıflandırılması amaçlanmıştır. Deney seti kullanılarak elmalardan alınan görüntüler üzerinde, derin öğrenme teknikleri kullanarak elmalarda kusur tespiti yapılmıştır. Elde edilen görüntüler öncelikle %70, %15 ve %15 oranlarında sırasıyla eğitim doğrulama ve test veri setleri olarak bölünmüştür. Bu veri setleri ile literatürde yer alan AlexNet ve InceptionV3 yapıları eğitilmiş ve devamında da bu yapılar test edilmiştir.

2. Materyal ve metod

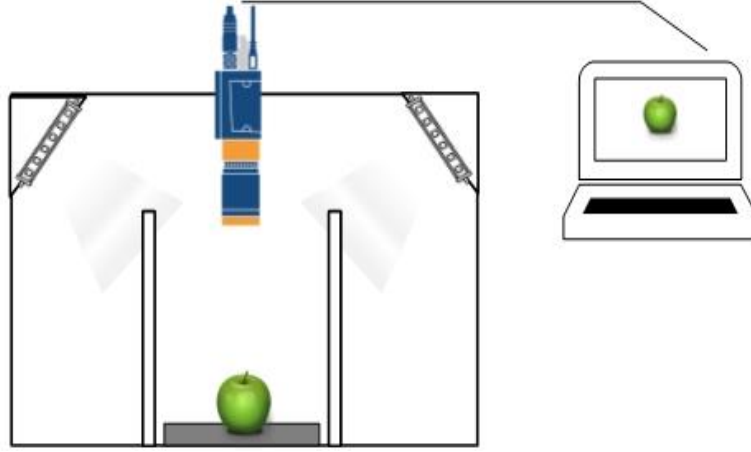
2.1 Deney düzeneği

Araştırmada kullanılacak bitki materyali, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Uygulama ve Araştırma alanında yer alan meyve bahçesinden temin edilmiştir (37°56’N-34°37’E). 2014 yılında tesis edilen bahçe, damla sulama sistemine sahip olup, bahçenin yıllık bakım işleri her bir çeşit için homojen

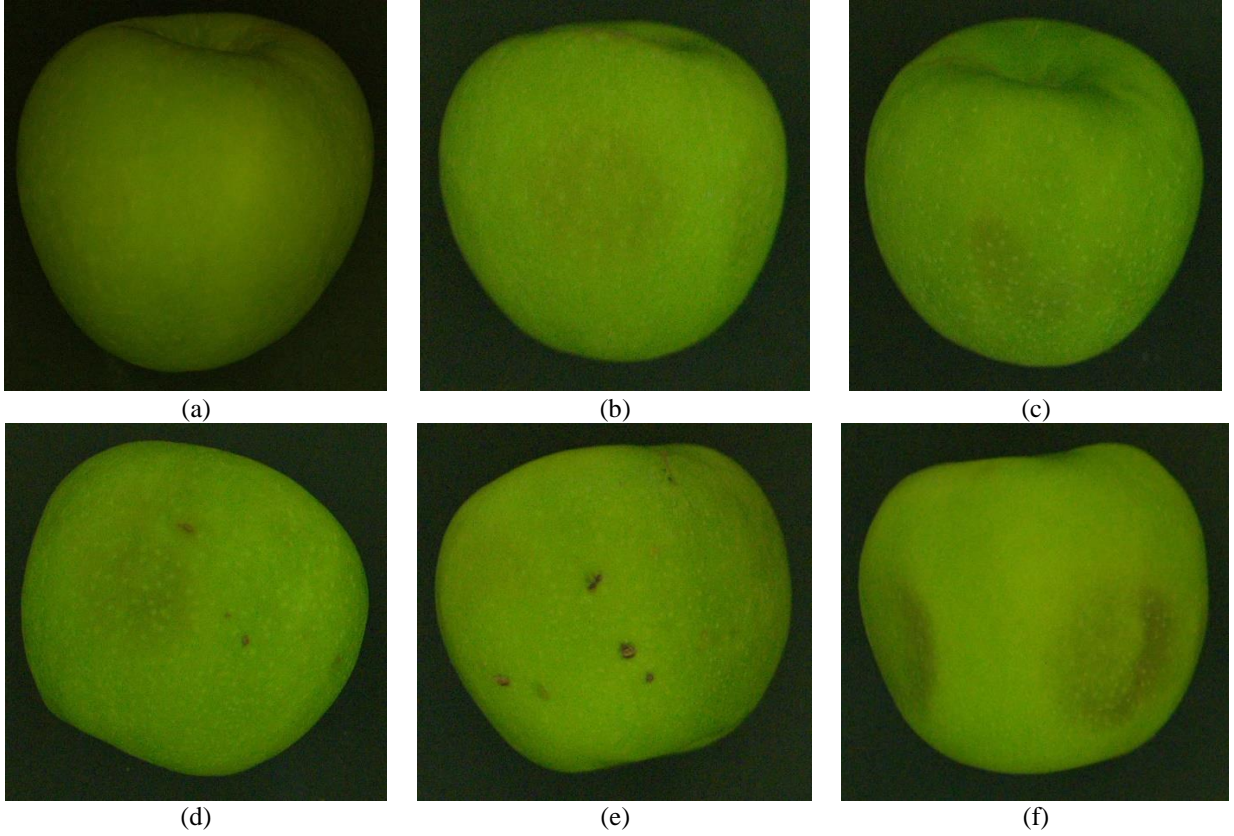
şekilde yapılmıştır. Elmalar, çeşide özgü ticari olgunluk aşamasına geldiğinde derimleri yapılmıştır. Derim sonrasında, yüzer adet fiziksel zararlanmalara sahip elmalar ile sağlam elmalar görüntü elde etmek için soğuk hava deposuna alınmıştır. 3 saat sonra depodaki elmaların görüntüleri alınmıştır. Çekilen görüntülerin ortam aydınlatmasından etkilenmemesi için Şekil 1’de verilen deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneği için duvarları beyaz renge boyanmış bir 60x60x60 cm ebatında kutu kullanılmıştır. Kutunun zeminine 2 cm kalınlığında siyah renge boyanmış bir sahne yerleştirilmiştir. Sahne renginin siyah olarak seçilmesinin sebebi, aydınlatmanın elma üzerindeki yansıma etkisini azaltmaktır. Elmaya

istenilen açıyı verebilmek için sahnenin tam ortasında 1 cm kalınlık ve 2 cm yarı-çapında bir oyuk açılmıştır.

Kutu duvarlarına 30 derecelik bir eğimle aydınlatma yerleştirilmiştir. Aydınlatmaların her birinin önüne elma üzerindeki yansımanın engellenmesi için %70 ışık geçirgenliği olan birer adet perde kullanılmıştır. Kutunun tavanına, kameranın USB kablo bağlantısı dışarıda ve kamera merceği sahneye bakacak şekilde kamera yerleştirilmiştir. Her bir elmanın 2 farklı yönden görüntüsü alınmıştır. Şekil 2’de deney seti kullanılarak alınan örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği



Şekil 2. Elma örnekleri: (a) Sağlam, (b) Hasarlı örnek 1, (c) Hasarlı örnek 2, (d) Hasarlı örnek 3, (e) Hasarlı örnek 4, (f) Hasarlı örnek 5

Şekil 2. (a)'da verilen görüntü sağlam elma sınıfına aittir. Elmanın yüzeyinde herhangi bir leke veya fiziksel zararlanma bulunmayıp, pürüzsüz görünümüne ait elmalar bu sınıfa seçilmiştir. Şekil 2. (b)'de verilen görüntüde, sert zemine çarpma sonucunda oluşup ve üstünden 3 saat geçtikten sonra oluşan hasarlı bölge gösterilmiştir. Şekil 2. (c)'de elmaların birbirine çarpması sonucu veya derimleri sırasında kasa kenarlarına çarpması sonucu oluşan, daha dar bir alanı kaplayan bir hasar gösterilmiştir. Şekil 2. (d)'de çarpma ve dolu zararı nedeniyle aynı elmanın yüzeyinde oluşturduğu zararlanma gösterilmiştir. Şekil 2. (e)'de sadece dolu zararı gösterilmiştir. Şekil 2. (f)'de elmalar bir hafta bekletildikten sonra oluşan hasarı örneklemek için verilmiştir, ancak deneyde bu örnekler kullanılmamıştır. Çalışmada sadece hasar oluştuktan 3 saat sonra oluşan zararlanmaların olduğu görüntüler kullanılmıştır.

Şekil 2'de verilen elma görüntüleri ön işlem uygulanmamış ham görüntülerdir. Deney düzeneği endüstriyel elma ayıklama makinesinin çalışma prensibini örnek olarak tasarlandığı için ön işleme sürecine gerek kalmadan kullanılmaya olanak sağlamıştır. Kamera 90 derece açı ile elmayı görüntü karesinin tam ortasına alacak şekilde yerleştirilmiş ve sahne renginin siyah olması, gürültüsüz görüntüler elde edilmesine imkân sağlamıştır. Aydınlatmaların yansımalarının elma üzerinde oluşması, deney düzeneği tasarımı ile engellendiği için görüntü işleme filtrelerine ihtiyaç duyulmamıştır. Derin öğrenme modellerinde, eğitimde kullanılmak üzere 200 adet sağlam ve 200 adet kusurlu elma görüntüsü elde edilmiştir.

2.2 Derin öğrenme ve evrişimsel sinir ağı (ESA) modeli

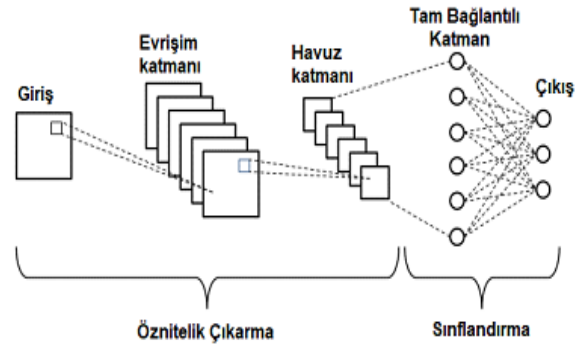
Derin öğrenme, veriler içerisinde bulunan saklı bilgiden en üst düzeyde yararlanmaya imkân tanıyan, iç içe geçmiş karmaşık verilerin temel taşlarını tanımlayarak daha başarılı sonuçlar elde eden makine öğrenmesi tekniğidir [51]. Derin öğrenme tekniğinin kullandığı çok katmanlı makine öğrenmesi modellerinde denetimli veya denetimsiz öğrenme, her katmandaki verilere doğrusal olmayan dönüşümler gerçekleştirilip bir üst, daha soyut katmana aktarıldıktan sonra gerçekleşir. Derin öğrenme modelinde ilk katman giriş katmanıdır. Sınıflandırılacak görüntüler bu katmanda pikseller bazında haritalanmaktadır. Sonraki katmanlarda sınıflandırmanın gerçekleşebilmesi için çeşitli dönüşümlerin ve hesaplamaların yapıldığı "Gizli Katman"lar vardır. Son olarak, derin öğrenme modelinde sınıflandırmanın sonucunu gösteren çıkış katmanı bulunur [52].

Bir makine öğrenim tekniğinin iyi performans gösterme yeteneği, öncelikle girdi verilerinin ne kadar iyi temsil edildiğine bağlıdır. Verilerin ön işlenmesi bu nedenle öğrenme sistemlerinin geliştirilmesinde çok önemli bir aşamadır. Öznitelik çıkarma işlemi sırasında, girdi verilerindeki özniteliklerin miktarını azaltmak için uzmanlardan yararlanmaya çalışılmaktadır. Bu özellik çıkarma etkinliği, lojistik regresyon ve destek vektör makineleri (SVM'ler) gibi yüzeysel öğrenme modellerinin etkinliği için gereklidir. Bu prosedür çok zaman ve çaba gerektirir, ancak çok önemlidir. Bu sorunu çözmeye görevini

basitleştirmek için algoritmaları kullanmak daha yararlı bir yaklaşımdır. Yüksek boyutlu verilerle uğraşmanın ve ayırt edici bilgileri çıkarmanın en iyi yollarından biri, derin öğrenme algoritmalarını kullanmaktır [54].

Geleneksel makine öğreniminin temel fikirleri, derin ağların oluşturulması üzerinde etkili olmuştur çünkü derin öğrenme, makine öğreniminin bir alt kümesidir [53, p. 98]. Bununla birlikte, deneysel araştırmalara göre, derin tasarımları öğretmek sığ olanlardan daha zordur [55]. Aktivasyon fonksiyonu, kayıp fonksiyonu ve optimizasyon yöntemi, sinir ağı modelinin hızlı ve verimli eğitimi sırasında doğru sonuçlar vermede çok önemli unsurlardandır [56]. Optimizasyon prosedürü, kayıp fonksiyon değerini azaltmak amacıyla katmanları oluşturan nöronların optimal ağırlık matrislerini belirlemek için kullanılır. Derin öğrenme ağı önceden belirlenmiş sayıda çevrim boyunca eğitilir ve her çevrimden sonra nöronların ağırlıkları, kayıp fonksiyonun değerinin düşmesine ve sonunda sifıra ulaşmasına neden olacak şekilde değiştirilir [57]. Bu nedenle öğrenme ve test sırasında kayıp fonksiyonun değerinin düşük olması, ağı bilgiyi öğrendiğini göstermektedir.

Derin öğrenme algoritmalarından meyve ve sebze sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan CNN algoritmasıdır [58], [59]. Beynin görsel korteksinin görsel bilgileri işleme prensiplerinden ilham alınarak tasarlanan CNN yapıları çok katmanlı sinir ağının özel bir türü olup ilk olarak Le Cun tarafından 1998'de LeNet-5 mimarisi olarak önerilmiş ve el yazısı tanıma probleminde uygulanmıştır [60]. CNN algoritmasının tercih edilmesinin sebebi, bir girdi görüntüsünden herhangi bir ön işleme gerek kalmadan istenilen özellikleri çıkarabilmeleridir. Üç ana katman kullanılarak oluşturulmuş klasik CNN mimarisi Evrişim katmanları, Havuz katmanları ve Tam Bağlantılı (FC) katmanlarından oluşur. Üç katmanlı CNN mimarisinin grafiksek gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. Bu katmanların derinliği ve genişliği değiştirilerek performansları geliştirebilmektedir [61].

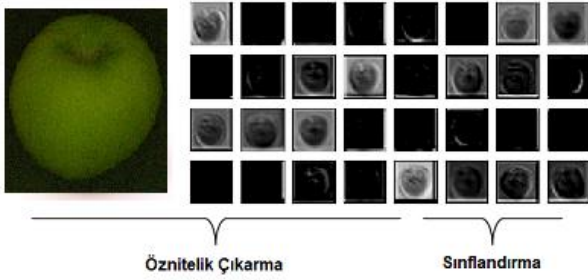


Şekil 3. Üç katmanlı CNN

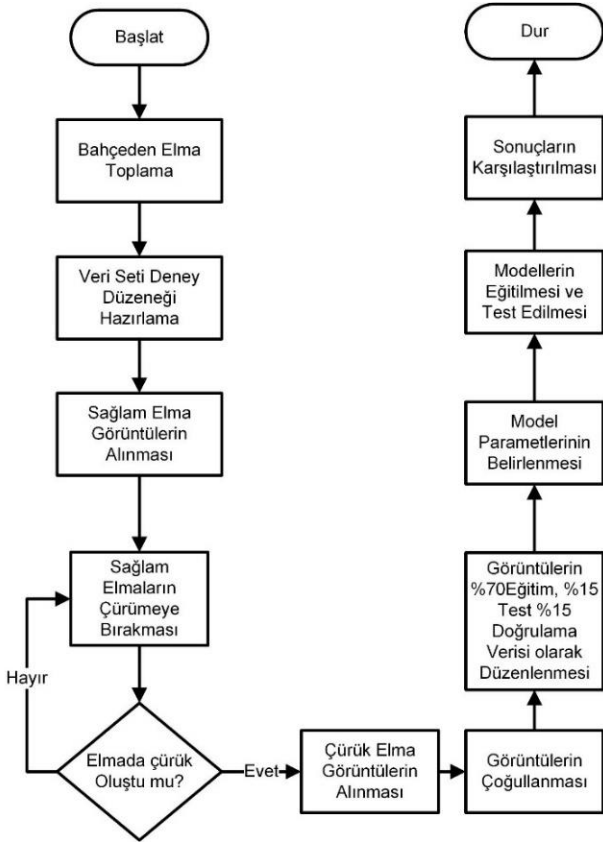
Evrişim ve havuzlama katmanları öznitelik çıkarma için kullanılırken, tam bağlantılı katmanları ise sınıflandırma için kullanılmaktadır. Giriş görüntülerini kademeli olarak daha düşük boyutlu özelliklere eşleme ve sonunda öznitelik vektörünü oluşturma işlemi, evrişim ve havuzlama

katmanlarında gerçekleşir. Tam bağlantılı katman ise özellik vektörünü kullanarak sınıflandırma yapar [62].

Evrişimli ağlar, görüntüleri yükseklik, genişlik ve derinlik olarak üç boyutlu hacim olarak algılar. Dijital renkli görüntüler Kırmızı-Yeşil-Mavi değerlerinden oluştuğundan nesnenin derinliği üç katman olarak kullanılır. Bu girdi görüntüsü, evrişim katmanını beslendikten sonra burada girdi görüntüsünden lineer evrişimli filtreler elde edilir. Daha sonra bu filtreler kullanılarak lineer olmayan Relu gibi aktivasyon fonksiyonları ile öznetelik vektörü elde edilir [61]. Şekil 4'te elma görüntüsü için 3. evrişim katmanının çıktısı örneği görülmektedir.



Şekil 4. Elma görüntüsü için 3. Evrişim katmanının çıktı örneği [63]



Şekil 5. Önerilen yöntem

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sonuçları mümkün olduğunca iyileştirmek için evrişimsel filtrelerin

boyutlarını ve havuzlama türlerini değiştirerek çok çeşitli CNN modelleri önerilmiştir. CNN yapılarının yaygınlaşması, AlexNet mimarisinin, 2012'de ImageNet yarışmasını kazandıktan sonra olmuştur [64]. AlexNet'ten sonra son on yılda VGGNet [65], ResNet [66], Inception [67], Xception [68], ve Efficientnet [69] gibi yeni derin öğrenme mimarileri geliştirilmiştir. Görüldüğü gibi daha hassas sınıflandırma için daha büyük ve daha gelişmiş modeller her geçen gün önerilmeye devam edilmektedir. Bununla birlikte, eğitim verilerinin eksikliği bu tür modellerin boyutunu ve öğrenme yeteneğini sınırlayabilir, çünkü büyük modeller daha çok veriye ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışmada ESA yapılarının yaygınlaşmasında büyük etkisi olan AlexNet ve efektif eğitim özelliğine sahip InceptionNet V3 yapıları "Granny Smit" elma çeşidinde, hasat sırasında zarar görmüş elmaları tespit etme problemi için uygulanmış ve etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem Şekil 5'te detaylı bir şekilde gösterilmiş olup; ilk aşamada veri setlerinin oluşturulması, devamında veri çoğullaması işlemleri yapılmaktadır. Yeterli sayıda veri elde edildikten sonra bu veriler %70 eğitim, %15 test ve %15 doğrulama olarak ayrılmıştır. Son aşamada ise AlexNet, VGG16 ve InceptionV3 evrişimli sinir ağı yapıları kullanılarak eğitim ve test sonuçları detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

2.3 Sınıflandırmada kullanılan başarı ölçütleri

Araştırmada fiziksel zararlanmalardan arı, sağlıklı elmalar negatif ve zarar görmüş elmalar pozitif olarak etiketlenmiştir. Sınıflandırıcının ürettiği sonuç, karışıklık matrisi bilinen bir yapıda temsil edilmektedir.

		Tahmin Edilen Sınıf	
		Pozitif Sınıf	Negatif Sınıf
Gerçek Sınıf	Pozitif Sınıf	a	b
	Negatif Sınıf	c	d

a: TP (True Pozitif) c: FP (False Pozitif)
DP (Doğru Pozitif) YN (Yanlış Negatif)
b: FN (False Negatif) d: TN (True Negatif)
YP (Yanlış Pozitif) DN (Doğru Negatif)

Şekil 6. Karışıklık matrisi

Şekil 6'da verilen karışıklık matrisi dört kategoriye sahiptir [70]:

- Doğru pozitifler (DP), doğru olarak etiketlenmiş kusurlu elmalardır.
- Yanlış pozitifler (YP), hatalı olarak etiketlenmiş kusurlu elmalardır.
- Doğru negatifler (DN) doğru olarak etiketlenmiş sağlam elmalardır.
- Yanlış negatifler (YN) hatalı olarak etiketlenmiş sağlam elmalardır.

Model doğruluğu, modellerin performansını değerlendirmek için en yaygın kullanılan başarı ölçütüdür. Doğru sınıflandırılan kusurlu elmalarla doğru etiketlenmiş olanların toplamı ile edilen (DP + DN) örneklerin tüm örneklerle oranı, doğruluk oranını hesaplamak için kullanılır. Hata oranı, yanlış sınıflandırılmış örnek sayısının (YP + YN), toplam örnek sayısına bölünmesiyle belirlenir. Doğruluk oranı ve hata oranı **Denklem (1)** ve **(2)** ifadesinde verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır [71].

$$\text{Doğruluk Oranı} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (1)$$

$$\text{Hata Oranı} = \frac{YP + YN}{DP + DN + YP + YN} \quad (2)$$

Dengesiz veri kümesinin sınıflandırma başarısını değerlendirirken sadece doğruluk oranı yeterli ölçüt değildir. Bunun yanı sıra seçicilik, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü değerlerinin de hesaplanması gerekmektedir [72]. Çalışmamızda 200 adet sağlıklı ve 200 hasarlı elma görüntüsü kullanılması dengeli sınıf olduğunu göstermektedir. Bu nedenle çalışmada başarı ölçütü olarak sadece doğruluk oranı ile hata oranı kullanılacaktır.

Modellerin eğitiminde kullanılmak üzere daha önce elde edilen 200 adet sağlam ve çürük elma görüntüleri görüntü çoğullama yöntemleri kullanılarak 500 adet sağlam ve 500 adet çürük elma görüntüsü elde edilmiştir. 500 adet sağlam elma görüntülerinin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test için ayrılmış ve "sağlam" sınıf olarak etiketlenmiştir. Aynı şekilde 500 adet kusurlu elma görüntüsünden oluşan verileri de %70, %15, %15 oranları kullanarak bölünmüş ve "kusurlu" sınıf olarak etiketlenmiştir. Böylece her sınıfta eğitim veri seti 350, doğrulama 75 ve test ise 75 adet elma görüntüsünden oluşmuştur.

2 Bulgular ve tartışma

Deneysel çalışmalar Intel Core i7-7700HQ CPU, 16GB RAM, 2TB, 5,400-rpm HDD, 256GB SSD, Nvidia RTX

2060 özelliklere sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Çalışmada modellerin tasarımı için Python, TensorFlow ve Keras yazılım platformları kullanılmıştır. Uygulama yazılım geliştirme ortamı olarak Spyder kullanılmıştır.

Uygulamada kullanılacak CNN yapılarındaki optimum parametreleri belirlemek adına **Tablo 2**'deki gibi bir çalışma yapılmıştır. İlk önce uygun öğrenme katsayısını (initial learning rate) belirlemek adına öğrenme katsayısı 0.001'den başlamak üzere her seferinde 10 kat küçültülerek 0.000001'e kadar küçültülmüştür. Tablodaki sonuçlara bakıldığında en optimum öğrenme katsayısının 0.000001 olduğu tespit edilmiştir.

Bir sonraki aşamada en optimum yığın boyutunu belirlemek adına; öğrenme katsayısı 0.000001 olmak üzere yığın boyutu 12, 32 ve 64 olarak seçilmiştir. **Tablo 2**'deki sonuçlara göre en optimum yığın boyutu 16 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu iki parametre (öğrenme katsayısı = 0.000001, yığın boyutu = 16) InceptionV3 ve VGG16 eğitim aşamasında kullanılacaktır. Bu iki parametrenin kullanılması ile tüm modeller (AlexNet, InceptionV3 ve VGG16) bu parametreler ile 100 epoch eğitildiğinde elde edilen test doğruluğu sonuçları **Tablo 3**'teki gibidir. Yine **Tablo 3**'te elde edilen sonuçlara ait eğitim grafikleri ise **Şekil 7, 8** ve **9**'daki gibidir.

Modelin başarısı, değerlendirilirken öğrenme grafiğinin incelenmesi kullanılacak algoritmanın güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. **Şekil 7**'de yeşil renk ile verilen doğrulama kayıp grafiği incelendiğinde 20. çevrime kadar azalma gösterirken, 30. çevrimden sonra yükselme olmuş ve 100. çevrim sonunda tekrar bir düşüş olmuştur.

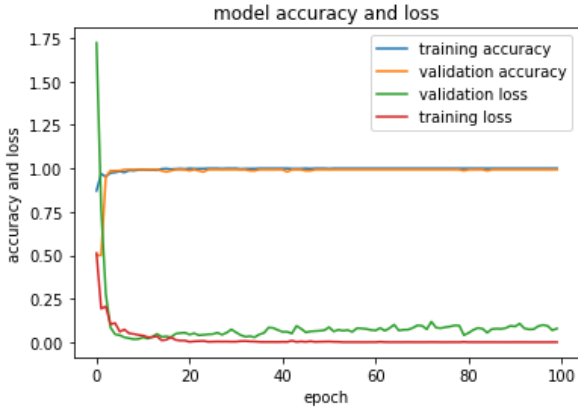
Şekil 8'de verilen InceptionV3 eğitim grafiğinde kırmızı renk ile gösterilen eğitim kaybı eğrisi 0.7 değeri ile başlayıp istikrarlı bir şekilde azalırken, mavi renk ile gösterilen eğitim doğruluğu, istikrarlı bir şekilde artmıştır. Grafikte turuncu ile gösterilen doğrulama kayıp eğrisinin ise ancak 20. çevrimde dengelendiği görülmüştür. Yine VGG16'ye ait eğitim grafikleri **Şekil 9**'daki gibidir.

Tablo 2. Optimum parametrelerin belirlenmesi

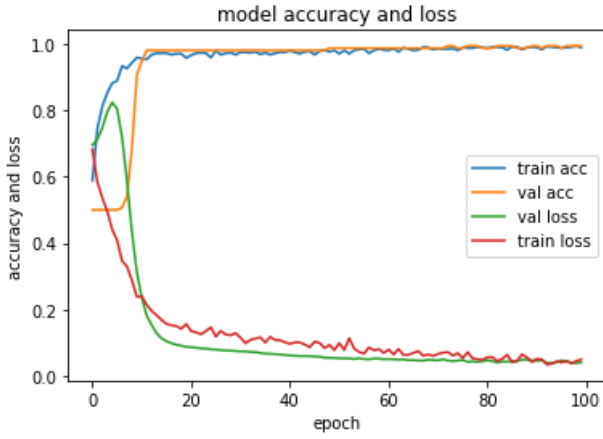
Deney No	Mimari	Öğrenme Katsayısı	Yığın Boyutu	Epochs	Test Kaybı	Test Doğruluğu
A	AlexNet	0.001	16	10	45.146	%56.67
1	AlexNet	0.0001	16	10	1.962	%86.67
2	AlexNet	0.00001	16	10	0.768	%86.67
3	AlexNet	0.000001	16	10	0.447	%90.00
4	AlexNet	0.0000001	16	10	0.814	%56.67
5	AlexNet	0.000001	32	10	0.598	%50.00
6	AlexNet	0.000001	64	10	0.644	%50.00

Tablo 3. Eğitim ve test sonuçları

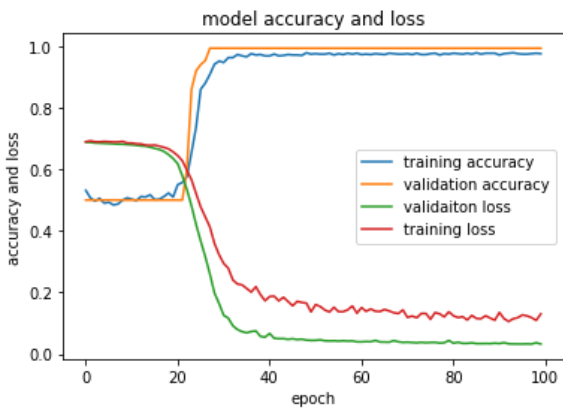
Deney No	Mimari	Öğrenme Katsayısı	Yığın Boyutu	Epochs	Test Kaybı	Test Doğruluğu
1	InceptionV3	0.000001	16	100	0.053	%98.67
2	VGG16	0.000001	16	100	0.127	%97.34
3	AlexNet	0.000001	16	100	0.238	%98.00



Şekil 7. AlexNet eğitim ve kayıp eğrileri



Şekil 8. InceptionV3 eğitim ve kayıp eğrileri



Şekil 9. VGG eğitim ve kayıp eğrileri

Modellerin 100 çevrim sonunda oluşturduğu Karışıklık matrisleri, AlexNet için Şekil 10'de, InceptionV3 için Şekil 11'de ve VGG16 için Şekil 12'de verilmiştir.

		Tahmin Edilen Sınıf	
		Kusurlu	Sağlam
Gerçek Sınıf	Kusurlu	75	0
	Sağlam	3	72

Şekil 10. AlexNet karışıklık matrisi

		Tahmin Edilen Sınıf	
		Kusurlu	Sağlam
Gerçek Sınıf	Kusurlu	74	1
	Sağlam	1	74

Şekil 11. InceptionV3 karışıklık matrisi

		Tahmin Edilen Sınıf	
		Kusurlu	Sağlam
Gerçek Sınıf	Kusurlu	75	0
	Sağlam	4	71

Şekil 12. Vgg16 karışıklık matrisi

Şekil 10'da verilen karışıklık matrisinde görüldüğü gibi 100 çevrimin sonunda AlexNet modelinde kusurlu sınıftaki elmaların hepsi doğru olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında, 3 adet sağlam sınıfta yer alması gereken elma kusurlu olarak tahmin edilmiştir. Şekil 11'de verilen karışıklık matrisinde görüldüğü gibi 100 çevrimin sonunda InceptionV3 modelinde her iki sınıfta 1'er adet yanlış sınıflandırma işlemi yapılmış ve en yüksek doğruluk InceptionV3 modelinde elde edilmiştir. VGG16 modeli

kusurlu elmaların hepsini doğru tahmin etmiş olup; sağlam elmalardan 4 tanesini yanlış tahmin etmiştir.

“Granny Smith” elma çeşidi sınıflandırma çalışmalarına bakıldığında literatürde yer alana sonuçlara göre daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Lu ve Lu (2017) çalışmalarında, “Granny Smith” elma çeşidinde SIRI görüntüleme sistemi kullanarak elde edilen görüntüleri kullanmışlardır. Çalışmada görüntü işleme teknikleri kullanılarak doğal olarak zedelenmiş elmaları %90 doğrulukla sınıflandırılmıştır [37]. Fan ve arkadaşları (2022), “Granny Smith” elmada NIR görüntüleme sistemi kullanarak elde edilen görüntüler kullanmışlardır [43]. Çalışmada YOLO-V4 kullanılarak kusurlu elmalar %93.9 doğrulukla sınıflandırılmıştır [43].

Çalışmada elde edilen sonuçlar, RGB görüntüleri ile “Granny Smith” elma görüntülerini sınıflandırma, bu çalışmalarda üretilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Fan ve diğerleri (2020), kendilerinin oluşturdukları ESA modelini kullanarak ‘Fuji’ elma çeşidinde kusurlu elmaları %96.5 doğruluk ile sınıflandırmıştır [24]. We ve diğerleri (2020), AlexNet modelini kullanarak ‘Aksu Fuji’ çeşidinde kusurlu elmaları %92.5 doğruluk ile sınıflandırmıştır [46]. Stasenko ve diğerleri (2021), U-Net, Deeplab, ve Mask R-CNN mimarilerini kullanarak kusurlu elmaları %98.81 doğruluk ile sınıflandırmıştır [48]. Xin ve diğerleri (2021), YOLOv3 mimarisini kullanarak kusurlu elmaları %97 doğruluk ile sınıflandırmıştır [49]. Xue ve diğerleri (2020), kusurlu elmaların tespiti için GoogLeNet modelini kullanmış ve elde edilen sonuçlara göre kesinlik oranı %91.91 olmuştur [50]. Ayaz ve diğerleri (2021), elma hastalığı sınıflandırması için ResNet, SqueezeNet ve MiniVGGNet gibi modeller kullanarak sınıflandırma yaptıklarında %99.99 genel doğruluk değerini elde etmişlerdir [51].

Sonuçlar

Bu çalışmada “Granny Smith” elma çeşidinden alınan görüntüler üzerinde derin öğrenme teknikleri kullanarak; özel koşul gerektirmeyen ve uygun maliyetle sınıflandırma ve kusur tespiti yapacak bir teknik araştırılmıştır. Böylesi bir tekniği geliştirmek için öncelikle el yordamıyla yapılmış bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Geliştirilen deney düzeneğinin içine kamera ve aydınlatma uygun açılarda ve pozisyonlarda yerleştirildikten sonra kusurlu ve kusursuz elmalara ait görüntüler toplanmıştır. Elde edilen bu görüntülerden %70, %15 ve %15 oranlarında sırasıyla eğitim doğrulama ve test veri setleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veri setleri ile literatürde yer alan AlexNet ve InceptionV3 yapıları eğitilmiş ve devamında da bu yapılar test edilmiştir. Çalışmada InceptionV3 modelinin 100 çevrim sonunda test doğruluğu %98.67, AlexNet modelinin ise test doğruluğu %98 ve VGG16 modelinin test doğruluğu %97.34 olarak elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, RGB görüntüleri ile “Granny Smith” elma çeşidi görüntülerini sınıflandırma çalışmalarında üretilen sonuçlara uygun olduğu görülmüştür. Literatürde “Granny Smith” elma çeşidi ile sınıflandırma çalışmalarına bakıldığında, bu çalışmada daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, uygulamada hasattan hemen sonra kusurlu elmaların tespit edilip ayrılmasıyla, hasat sonrası oluşabilecek ekonomik kayıpların önüne geçilmesi sağlayabilecektir. Gelecek çalışmalarda elma kusurlarının nispeten daha zor görüldüğü elma çeşitleri seçilerek, kızıl ötesi kamera ile görüntü alınması hedeflenmektedir. Böylece elma rengine bağlı olmaksızın elma kusurlarının tespitinin yapılabileceği ve tüm elma çeşitlerinde kullanılabilmesi düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu araştırma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü’nce desteklenmiştir. Proje No: TGT 2021/22-BAGEP

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] FAOStat, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, Accessed 13 June 2021.
- [2] M. Ünlü, Derim Sonrası Kayıplar, <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/alata/Belgeler/Diger-belgeler/>, Accessed 1 January 2015.
- [3] A. E. Özdemir, E. Çandır, Ö. Dündar ve R. Dilbaz, Üreticiden tüketiciye ulaşıncaya kadar geçen süreçte elmalardaki kayıplar ve önleme yolları. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 2(1), pp. 165-168, 2009.
- [4] H. Özgönen ve H. Ç. Kılıç, Isparta ilinde elmalarda sorun olan hasat sonrası hastalıkların ve yaygınlık oranlarının belirlenmesi. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 2(2), pp. 53-60, 2009.
- [5] Z. Hu, Bruise detection in apples using 3D infrared imaging and machine learning technologies. Michigan Technological University, A Dissertation, Michigan, 2017. <http://dx.doi.org/10.37099/mtu.dc.etr/509>
- [6] F. Vega ve M. C. Torres, Automatic detection of bruises in fruit using Biospeckle techniques. In *Symposium of Signals, Images and Artificial Vision-2013: STSIVA-2013*, Bogotá, Colombia, 2013. <http://dx.doi.org/10.1109/STSIVA.2013.6644916>
- [7] Y. C. Chiy ve C. H. Chen, Development of on-line apple bruise detection system. *Engineering in agriculture, environment, and food*, 10(3), pp. 223-232, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eaef.2017.03.003>
- [8] Y. Lu, R. Li ve R. Lu, Structured-illumination reflectance imaging (SIRI) for enhanced detection of fresh bruises in apples. *Postharvest Biology and Technology*, 117, pp. 89-93, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.02.005>
- [9] J. Li, W. Huang, X. Tian, C. Wang, S. Fan ve C. Zhao, Fast detection and visualization of early decay in citrus using Vis-NIR hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, pp. 582-592, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.016>

- [10] J. C. Keresztes, M. Goodarzi, W. Saeys, Real-time pixel based early apple bruise detection using short wave infrared hyperspectral imaging in combination with calibration and glare correction techniques. *Food Control*, 66, pp. 215-226, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.02.007>
- [11] W. Che, L. Sun, Q. Zhang, W. Tan, D. Ye, D. Zhang ve Y. Liu, Pixel based bruise region extraction of apple using Vis-NIR hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 146., pp. 12-21, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.013>
- [12] E. Diels, M. van Dael, J. Keresztes, S. Vanmaercke, P. Verboven, B. Nicolai, W. Saeysa, H. Ramona ve B. Smeets, Assessment of bruise volumes in apples using X-ray computed tomography. *Postharvest Biology and Technology*, 128, pp. 24-32, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.013>
- [13] O. Doosti-Irani, M. R. Golzarian, M. H. Aghkhani, H. Sadrnia ve M. Doosti-Irani, Development of multiple regression model to estimate the apple's bruise depth using thermal maps. *Postharvest Biology and Technology*, 116, pp. 75-79, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.024>
- [14] D. Jawale ve M. Deshmukh, Real time automatic bruise detection in (Apple) fruits using thermal camera. In 2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)., Tamilnadu, India, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/iccsp.2017.8286542>
- [15] Z. Du, X. Zeng, X. Li, X. Ding, J. Cao ve W. Jiang, Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 99, pp. 133-141, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.024>
- [16] J. Varith, G. M. Hyde, A. L. Baritelle, J. K. Fellman ve T. Sattabongkot, Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(2), pp. 211-218, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/s1466-8564\(03\)00021-3](http://dx.doi.org/10.1016/s1466-8564(03)00021-3)
- [17] R. Lu, Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 46 (2), pp. 523-530, pp. 523-530, 2003. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.12941>
- [18] G. ElMasry, N. Wang, C. Vigneault, J. Qiao and A. ElSayed, Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging. *LWT-Food Science and Technology*, 41(2), pp. 337-345, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2007.02.022>
- [19] R. Lu, H. Cen, M. Huang ve D. P. Ariana, Spectral absorption and scattering properties of normal and bruised apple tissue. *Transactions of the ASABE*, 53(1), pp. 263-269, 2010. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.29491>
- [20] W. Huang, J. Li, Q. Wang ve L. Chen, Development of a multispectral imaging system for online detection of bruises on apples. *Journal of Food Engineering*, 146, pp. 62-71, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.09.002>
- [21] W. Tan, L. Sun, F. Yang, W. Che, D. Ye, D. Zhang ve B. Zou, The feasibility of early detection and grading of apple bruises using hyperspectral imaging. *Journal of Chemometrics*, 32(10), p. e3067, 2018. <http://dx.doi.org/10.1002/cem.3067>
- [22] M. Zhang ve G. Li, Visual detection of apple bruises using AdaBoost algorithm and hyperspectral imaging. *International Journal of Food Properties*, 21(1), pp. 1598-1607, 2018. <http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2018.1503299>
- [23] S. Zhang, X. Wu, S. Zhang, Q. Cheng ve Z. Tan, An effective method to inspect and classify the bruising degree of apples based on the optical properties. *Postharvest Biology and Technology*, 127, pp. 44-52, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.12.008>
- [24] S. Fan, J. Li, Y. Zhang, X. Tian, Q. Wang, X. He, C. Zhang ve W. Huang, On line detection of defective apples using computer vision system combined with deep learning methods. *Journal of Food Engineering*, 286, p. 110102, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110102>
- [25] J. Xing, V. Van Linden, M. Vanzebroeck ve J. De Baerdemaeker, Bruise detection on Jonagold apples by visible and near-infrared spectroscopy. *Food control*, 16(4), pp. 357-361, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.03.016>
- [26] K. Kayaalp ve S. Metlek, Classification of robust and rotten apples by deep learning algorithm. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 3(2), pp. 112-120, 2020. <http://dx.doi.org/10.35377/saucis.03.02.717452>
- [27] V. Leemans, H. Magein ve F. Destain, On-line fruit grading according to their external quality using machine vision. *Biosystem Engineering* vol. 83, no. 4, p. 397-404, 2002.
- [28] D. Unay ve B. Gosselin, Automatic defect segmentation of Jonagold apples on multi-spectral images: A comparative study. *Postharvest Biology and Technology*, 42(3), pp. 271-279, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.06.010>
- [29] D. Unay, B. Gosselin, O. Kleynen, V. Leemans, M. F. Destain ve O. Debeir, Automatic grading of Bi-colored apples by multispectral machine vision. *Computers and electronics in agriculture*, 75(1), pp. 204-212, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.11.006>
- [30] X. Luo, T. Takahashi, K. Kyo ve S. Zhang, Wavelength selection in vis/NIR spectra for detection of bruises on apples by ROC analysis. *Journal of Food Engineering*, 109(3), pp. 457-466, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.035>
- [31] J. C. Keresztes, E. Diels, M. Goodarzi, N. Nguyen-Do-Trong, P. Goos, B. Nicolai ve W. Saeys, Glare based apple sorting and iterative algorithm for bruise region detection using shortwave infrared hyperspectral imaging. *Postharvest biology and technology*, 130, pp. 103-115, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.04.005>

- [32] C. Ferrari, G. Foca, R. Calvini ve A. Ulrici, Fast exploration and classification of large hyperspectral image datasets for early bruise detection on apples. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 146, pp. 108-119, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.05.016>
- [33] Q. Zhu, J. Guan, M. Huang, R. Lu ve F. Mendoza, Predicting bruise susceptibility of Golden Delicious apples using hyperspectral scattering technique. *Postharvest Biology and Technology*, 114, pp. 86-94, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.007>
- [34] Y. C. Chiu, X. L. Chou, T. E. Grift ve M. Chen, Automated detection of mechanically induced bruise areas in golden delicious apples using fluorescence imagery. *Transactions of the ASABE*, 58(2), pp. 215-225, 2015. <http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.10578>
- [35] R. Li, Y. Lu ve R. Lu, Structured illumination reflectance imaging for enhanced detection of subsurface tissue bruising in apples. *Transactions of the ASABE*, 61(3), pp. 809-819, 2018. <http://dx.doi.org/10.13031/aim.20162460153>
- [36] Y. Lu, R. Li ve R. Lu, (2016a). Fast demodulation of pattern images by spiral phase transform in structured-illumination reflectance imaging for detection of bruises in apples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, p. 652-658, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.012>
- [37] Y. Lu ve R. Lu, Using composite sinusoidal patterns in structured-illumination reflectance imaging (SIRI) for enhanced detection of apple bruise. *Journal of food engineering*, 199, pp. 54-64, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.008>
- [38] P. Baranowski, W. Mazurek, B. Witkowska-Walczak ve C. Sławiński, Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography. *Postharvest biology and technology*, 53(3), pp. 91-100, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.04.006>
- [39] Y. Lu ve R. Lu, Histogram-based automatic thresholding for bruise detection of apples by structured-illumination reflectance imaging. *Biosystems Engineering*, 160, pp. 30-41, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.005>
- [40] A. Siedliska, P. Baranowski ve W. Mazurek, Classification models of bruise and cultivar detection on the basis of hyperspectral imaging data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106, pp. 66-74, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.05.012>
- [41] J. F. I. Nturambirwe, H. H. Nieuwoudt, W. J. Perold ve U. L. Opara, Detecting bruise damage and level of severity in apples using a contactless NIR spectrometer. *Applied Engineering in Agriculture*, 36(3), pp. 257-270, 2020. <http://dx.doi.org/10.13031/aea.13218>
- [42] J. F. Nturambirwe, E. A. Hussein, M. Vaccari, C. Thron, W. J. Perold ve U. L. Opara, Feature reduction for the classification of bruise damage to apple fruit using a contactless FT-NIR spectroscopy with machine learning. *Foods*, 12(1), p. 210, 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/foods12010210>
- [43] S. Fan, X. Liang, W. Huang, V. J. Zhang, Q. Pang, X. He, L. Li ve C. Zhang, Real-time defects detection for apple sorting using NIR cameras with pruning-based YOLOV4 network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, p. 106715, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2022.106715>
- [44] A. Beyaz, R. Ozturk ve U. Turker, Assessment of mechanical damage on apples with image analysis. *Food, Agriculture & Environment (JFAE)*, 8(3&4), pp. 476-480, 2010.
- [45] S. Albawi, T. A. Mohammed ve S. Al-Zawi, Understanding of a convolutional neural network. In 2017 international conference on engineering and technology (ICET), Antalya, Turkey, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEngTechnol.2017.8308186>
- [46] A. Wu, J. Zhu ve T. Ren, Detection of apple defect using laser-induced light backscattering imaging and convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*, 81, p. 106454, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106454>
- [47] A. Kumar, R. C. Joshi, M. K. Dutta, M. Jonak ve R. Burget, Fruit-CNN: An Efficient Deep learning-based fruit classification and quality assessment for precision agriculture. In 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2021. <http://dx.doi.org/10.1109/ICUMT54235.2021.9631643>
- [48] N. Stasenkov, M. Savinov, V. Burlutskiy, M. Pukalchik and A. Somov, Deep Learning for postharvest decay prediction in apples. In IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2021. <http://dx.doi.org/10.1109/iecon48115.2021.9589498>
- [49] Y. Xin, S. Ma, Y. Wei, J. Hu, Z. Ding ve F. Wang, Detection of apple surface defect based on YOLOv3. In 2021 ASABE Annual International Virtual Meeting, 2021. <http://dx.doi.org/10.13031/aim.202100611>
- [50] Y. Xue, L. Wang, Y. Zhang and Q. Shen, Defect detection method of apples based on GoogLeNet Deep Transfer Learning. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 51(7), p. 30-35, 2020.
- [51] H. Ayaz, E. Rodríguez-Esparza and M. Ahmad, Classification of apple disease based on non-linear deep features. *Applied Sciences*, 11(14), p. 6422, 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/app11146422>
- [52] N. D. Lewis, *Deep Learning made easy with R, USA: Auscov*, 2016.
- [53] I. Goodfellow, Y. Bengio ve A. Courville, *Deep Learning*, MIT Press, 2016.
- [54] S. S. Mousavi, M. Schukat ve E. Howley, (2016, September). Deep reinforcement learning: an overview. In *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*, London, UK, 2016.

- [55] Y. Bengio, Learning deep architectures for AI. Foundations and trends® in Machine Learning, 2(1), 1-127. Boston: Now publishers inc., 2009.
- [56] A. Agrawal, Loss Functions and Optimization Algorithms, <https://medium.com/data-science-group-iitr/loss-functions-and-optimization-algorithms-demystified-bb92daff331c>, Accessed 9 September 2017
- [57] Y. B. Özçelik ve A. Altan, Diyabetik retinopati teşhisi için Fundus görüntülerinin derin öğrenme tabanlı sınıflandırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (29), pp. 156-167, 2021. <http://dx.doi.org/10.31590/ejosat.1011806>
- [58] Z. Ünal, T. Kızıl Deniz Gürbüz, M. Özden ve H. Aktaş, Classification of red apple varieties with deep learning models. IV. International Turkic World Congress on Science and Engineering, Niğde, 2022.
- [59] O. Cömert, M. Hekim ve K. Adem, Faster R-CNN kullanarak elmalarda çürük tespiti. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 11(1), pp. 335-341, 2019.
- [60] Y. LeCun , L. Bottou, Y. Bengio ve P. Haffner, Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11), pp. 2278-2324, 1998. <http://dx.doi.org/10.1109/5.726791>
- [61] A. Kausar, M. Sharif, J. Park ve D. R. Shin, Pure-cnn: A framework for fruit images classification. In 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), 2018.
- [62] S. Lu, Z. Lu, S. Aok ve L. Graham, Lu, S., Lu, Z., Aok, S., Graham, L. 2018, November. Fruit classification based on six layer convolutional neural network. In 2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP), 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/icdsp.2018.8631562>
- [63] J. Naranjo-Torres, M. Mora, R. Hernández-García, R. J. Barrientos, C. Fredes ve A. Valenzuela, A review of convolutional neural network applied to fruit image processing. Applied Sciences, 10(10), p. 3443, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/app10103443>
- [64] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton, Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems, 25, pp. 1097-1105., 2012. <http://dx.doi.org/10.1145/3065386>
- [65] K. Simonyan and A. Zisserman, Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), San Diego, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- [66] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, Identity mappings in deep residual networks. In European conference on computer vision, Amsterdam, The Netherlands, 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-46493-0_38
- [67] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens and Z. Wojna, Rethinking the inception architecture for computer vision. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Las Vegas, USA, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2016.308>
- [68] F. Chollet, Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Honolulu, USA, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2017.195>
- [69] M. Tan ve Q. Le, Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In International conference on machine learning, 2019.
- [70] J. Davis ve M. Goadrich, The relationship between Precision-Recall and ROC curves. In Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning., pp. 233-240, 2006. <http://dx.doi.org/10.1145/1143844.1143874>
- [71] N. Canbaz, Nesneye dayalı yazılımların tasarım kalitesini ölçmek için öğrenme tabanlı bir yöntem. İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilgisayar ve Bilişim Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul (Danışman: Doç. Feza Buzluca), 2015.
- [72] R. Halepmollası, Alt sekans profil haritaları kullanılarak protein katlanması tanıma. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul (Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ömer Sinan Saraç), İstanbul, 2016





Biyogaz üretim süreçlerinde kullanılacak en uygun risk değerlendirme metodolojisinin analitik hiyerarşi prosesi ile belirlenmesi

Determination of the most appropriate risk assessment methodology to be used in biogas production processes by analytical hierarchy process

Rıfat Yıldırım^{1,*} 

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sütçüler Prof. Dr. Hasan Gürbüz Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenliği Bölümü, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, 32920, Isparta Türkiye

Öz

Biyodizel, biyogaz ve bioetanol dünya genelinde artan enerji taleplerini karşılamak için kullanılacak enerji kaynaklarıdır. Enerji üretiminde önemli yere sahip olan biyogaz tesisleri, işin doğası veya kullanılan ekipmanlar nedeniyle, bazı tehlikeler ve buna bağlı riskler içermektedir. Bu çalışmanın amacı, biyogaz üretim tesislerinde risk değerlendirme yöntemlerinin analitik hiyerarşi süreci yardımıyla belirlenmesidir. Analitik hiyerarşi sürecinde kriterler “Zaman”, “Parametre Sayısı”, “Analist Yetkinliği”, “Veri Toplama Basamakları”, “Sektörel Yaygınlık” ve “Analizin Başarı Oranı” olarak belirlenmiştir. Çalışmanın alternatifleri ise “L Matris”, “X Matris”, “Fine Kinney” ve “Hata Türü ve Etkileri Analizi” olarak seçilmiştir. Çalışmada “Başarı Oranı” kriteri 0.46 puan ile en yüksek ağırlıklı kriter, Hata Türü ve Etkileri Analiz metodu ise 0.606 puan ile en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Çok tehlikeli ve tehlikeli sınıfta yer alan biyogaz tesisleri için kullanılan risk analiz yöntemlerinde “Başarı Oranı” kriteri oldukça önemlidir. Bu nedenle, “Başarı Oranı” kriteri yüksek olan Fine Kinney metodunun, Hata Türü ve Etkileri Analiz metoduna alternatif olabileceği görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Analitik hiyerarşi süreci, Biyogaz, Hata türü ve etkileri analizi

1 Giriş

Enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılan fosil yakıtların oluşturdukları sera gazı ile küresel ısınmaya neden olduğunun anlaşılmasından sonra, daha az kirletici parametre oluşturan yenilenebilir enerji kaynakları arayışı ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Organik atıklar biyoetanol, biyogaz, biyodizel vb. (biyokütle) dönüştürülebilir ve bu atıklardan çok miktarlarda biyoyakıt üretilmektedir [1]. Artan enerji talebini karşılamak için biyokütle enerjisi önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır [2]. Bu biyoyakıtlar arasında biyogaz, biyokütleli anaerobik fermentasyonundan kaynaklanan ve enerji üretmek için kullanılabilen bir gaz kombinasyonudur ve %60-75 metan (CH₄), %23-38 karbondioksit (CO₂) ve eser

Abstract

Biodiesel, biogas and bioethanol are among the energy sources that can be used to meet the increasing energy demands worldwide. Due to the nature of the operation or the tools employed, biogas facilities, which play a significant role in energy generation, come with various risks and dangers. The aim of this study is to determine risk assessment methods in biogas production facilities with the help of analytical hierarchy process. In the analytical hierarchy process, the criteria were determined as “Time”, “Number of Parameters”, “Analyst Competence”, “Data Collection Steps”, “Sectoral Prevalence” and “Success Rate of Analysis”. Alternatives of the study were chosen as “L Matrix”, “X Matrix”, “Fine Kinney” and “Failure Mode and Effects Analysis”. The “Success Rate” criteria were found to be the most weighted criterion in the study, receiving 0.46 points, while the Failure Mode and Effects Analysis approach was shown to be the best option, receiving 0.606 points. “Success Rate” in risk analysis methods used for biogas plants classified as very dangerous and dangerous criterion is very important. Therefore, the “Success Rate” Fine Kinney method, which has a high criterion, can be an alternative to the Failure Mode and Effects Analysis method.

Keywords: Analytical hierarchy process, Biogas, Failure mode and effects analysis

miktarda hidrojen (H₂) ve hidrojen sülfür (H₂S) içerir [3]. Organik atıkların kontrollü olarak anaerobik koşullarda biyogaza dönüştürülmesi ile organik atıklardan enerji elde edilmekte, sera gazı emisyonları kontrol altında tutulmakta, katı atık depolama tesislerinde fazla olan organik atık yükleri azaltılarak bu atıklardan ayrıca gelir elde edilmektedir.

Biyogaz kullanılarak üretilen elektrik enerjisi, sera gazı emisyonlarını azaltmasının yanında, organik atık ve artık maddelerin anaerobik fermentasyonu sonucu oluşan cüruf, toprak iyileştirici olarak kullanılabilir. Bu faydalar göz önüne alındığında, alternatif yakıtlar arasında önemli bir konuma sahip olan biyogaz [4], kullanılması daha çevreci olan bir enerji kaynağıdır [5]. CH₄, biyogazın ısı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: rifat_1319@hotmail.com (R. Yıldırım)

Geliş / Received: 07.03.2023 Kabul / Accepted: 21.08.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1261660

değerini belirleyen en önemli bileşenidir ve bu gaz CO₂ gazından 21 kat [6] veya 23 kat [7] daha fazla sera etkisine sahiptir. Organik maddelerin kontrollü veya kontrolsüz şekilde anaerobik bozunmasıyla ortaya çıkan biyogazın kontrol altında tutulması, küresel ısınmanın durdurulması ve bunun finansal faydalarının artırılması için yapılması gereken önemli çalışmalardan biridir [7].

Biyogazın aydınlatma ve ısıtma amaçlı doğrudan kullanımı, elektrik ve mekanik enerjiye dönüştürülmesi, onu esnek bir enerji kaynağı yapmaktadır. Biyogaz sıkıştırıldığında, otomobil yakıtı (CNG) olarak sıkıştırılmış doğal gazın yerine kullanılabilir. Ek olarak, biyogaz üretiminin fermente edilmiş atıkları, kalitesini artırmak için toprağa uygulanabilmektedir [7]. Türkiye için yapılan çalışmalardan elde edilen veriler (Tablo 1) dikkate alındığında, biyogaz tesisleri için hem substrat hem de mikroorganizma kaynağı olan hayvansal atıkların 193.9 Mton/yıl olduğu görülmektedir. Bu yüksek atık potansiyelinin biyogaza ve dolayısıyla enerjiye çevrimi için Türkiye genelinde kurulu olan 199 adet Biyokütle Kaynaklı Elektrik Üretim Santrali bulunmaktadır. Bu santrallerden elde edilen enerji yılda 3.89 Milyon Ton Eşdeğerinde Petrol (MTEP) miktarlarındadır. Atık potansiyeline göre teorik enerji değeri ise 34 MTEP/yıl civarındadır [8]. Halihazırda kurulu olan santrallerin ürettiği biyogaz miktarı, üretilen biyogaz potansiyelinin yaklaşık 1/10'u düzeyindedir. Ülkemizin, ekonomik enerji eşdeğeri ile teorik enerji eşdeğeri arasındaki önemli farkı ortadan kaldırarak, ekonomik enerji eşdeğerini yükseltecek önemli bir organik atık potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.

Tablo 2. Türkiye'deki 2021 yılı enerji kaynakları, atık ve enerji miktarları [8]

Toplam Hayvan Sayısı	422 832 374 Adet
Hayvansal Atık Miktarı	193 878 079 ton/yıl
Hayvansal ve Bitkisel ATED ve Belediye ABUO-TEE	30.2 MTEP/yıl
Hayvansal ve Bitkisel AEED ve Belediye ABUO-EEE	2.6 MTEP/yıl
Atıkların Toplam TEE	34 002 549 TEP/yıl
Atıkların Toplam EEE	3 892 422 TEP/yıl
Santral Sayısı	199

ATED: Atıkların Teorik Enerji Değeri

AEED: Atıkların Teorik Enerji Değeri

ABUO-TEE: Atıklarından Biyometanizasyona Uygun Olanlar- Teorik Enerji Eşdeğeri

ABUO-EEE: Atıklarından Biyometanizasyona Uygun Olanlar- Ekonomik Enerji Eşdeğeri

Biyogaz üretim tesisleri, çok küçük ölçekli olan aile tipi biyogaz tesislerinden başlayarak çiftlik tipi ve merkezi biyogaz tesislerini içeren tarımsal biyogaz tesisleri, atıksu arıtma tesislerinden çıkan atık çamurun kullanıldığı tesisler, endüstriyel biyogaz tesisleri ve çöp gazı geri kazanım tesisleri olarak günümüzde kullanılmaktadır [9, 10].

Biyogaz tesislerinde hammadde taşınmasının yapılması nedeniyle araç kazaları, taşınan malzemelerden kaynaklanacak mikrobiyolojik tehlikeler, depo alanında

çökmeler, araçların egzozlarından kaynaklı meslek hastalıkları meydana gelebilmektedir. Aynı zamanda işletme bünyesinde çalışanların gürültü, titreşim, elektrik, ergonomik olmayan malzeme ve ekipman kullanımından kaynaklanacak ve biyogazın solunması, gaz patlaması sonucunda meydana gelebilecek iş kazaları ve meslek hastalıklarıyla karşılaşma ihtimalleri bulunmaktadır [10].

Çalışma ortamlarında iş kazaları ve meslek hastalıklarına yol açabilecek tehlikeleri tam olarak belirlemek ve bu tehlikelerden kaynaklanabilecek risklerin birbirleriyle etkileşimini incelemek, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) çalışmaları açısından oldukça önemlidir [11].

Enerji üretiminde önemli yere sahip olan biyogaz tesisleri de sektörel bazda uzmanlaşma gerektiren ve yapılan işin doğası veya kullanılan ekipmanlar nedeniyle, bazı tehlikeler ve buna bağlı olarak bazı riskler içeren sektörlerdendir [12]. Fiziksel (gürültü, titreşim, aydınlatma vb.), kimyasal ve biyolojik (patojen mikroorganizma) risk unsurları içerdiğinden dolayı biyogaz tesisleri, İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği'ne göre biyogaz üretimi yapılan işletmeler için 38.21.01 nace koduyla "Tehlikeli", biyogazdan elektrik üreten tesisler için ise 38.11.19 nace koduyla "Çok Tehlikeli" olarak sınıflandırılmaktadır [13]. Biyogazın patlaması ve çalışanların bu gazı solunması nedeniyle meydana gelecek sağlık sorunları, her iki işletme için de en büyük ortak risktir. Ayrıca anaerobik reaktörlerde bulunan biyogaz cürufuna teması nedeniyle bulaşıcı hastalıkların meydana gelmesi biyogaz üretim tesislerinde en büyük risklerdendir.

Tehlike sınıfları ve oluşabilecek riskler göz önüne alındığında bu tesislerin kurulumu ve işletilmesi sırasında sağlık, güvenlik ve çevre koruma önlemlerinin eksiksiz uygulanabilmesi için iş güvenliği tedbirlerine önem gösterilmesi gerekmektedir [14]. Bu nedenle, işyerlerinde tehlikeden kaynaklı kayıp yaralanma hasar ortaya çıkmadan (proaktif) kontrol altına almak, iş güvenliği çalışmalarının esasını oluşturmaktadır. Bu amaca uygun olarak da işyerlerinde tehlike kaynakları belirlenerek bu kaynakların oluşturduğu risklerin belirlendiği risk değerlendirmesinin yapılması önem arz etmektedir [12].

Risk değerlendirmesi için hem nicel hem de nitel metodolojiler kullanılabilir [15]. Yapılan çalışmalarda yaygın risk değerlendirme teknikleri olan L Matris, Kontrol Listeleri, Fine-Kinney, Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), X Matris, Hata Ağacı Analizi (FTA), Tehlike ve İşlenebilirlik Analizi (HAZOP) ve Kaza Sonuç Analizi (ETA) kullanılmaktadır [15, 16]. Bu risk değerlendirme metodolojileri içerisinde en yaygın kullanılan yöntemin, L matris olduğu anlaşılmaktadır [15-29]. L Matris yönteminin tek kişi tarafından yapılabilen ve kısa sürelerde tamamlanabilen kolay bir yöntem olması tercih edilme sebeplerinin en önemlilerindedir. Ancak bu matrisin değerlendirme kriterlerinin yetersiz olması ve tecrübe gereksiniminin az olması nedeniyle, risk skorlarının belirlenmesinde yanlışlıklar yapılması mümkün olmaktadır. Aynı zamanda bu matrisin kısıtlarından birisi de olasılık ve şiddetin belirlenmesinde, olasılığı yüksek, şiddeti az olan bir durum ile şiddeti yüksek, olasılığı düşük olan bir durumun risk skorlarının eşit olabilmesidir. Bu durum

olayların öncelik sıralamalarını etkileyeceği için önemli risklerin gözden kaçmasına neden olabilmekte ve kısa sürede düzeltilebilecek bir durumu işin içinden çıkılamayacak hale getirebilmektedir. Bu nedenle çoğu işletmede L Matrisin yanında diğer metodolojilerden biri veya birkaçı kullanılarak risklerin gözden kaçmasını engelleme çalışmaları söz konusu olmalıdır. İşletmelerde hangi Risk Değerlendirme Metodolojilerinin seçilmesi gerektiği çoğu zaman belirlemesi zor bir iştir. Analistler genel olarak kullanılacak analizi seçerken, daha önceki analizlerde edindiği tecrübelerine veya zaman sıkıntısı nedeniyle en kısa sürede bitirilecek olan yöntemlere yönelmektedirler. Bu durum, işe/işleme uygun risk metodolojisinin seçiminde yanlışlık yapılmasına neden olmakta ve uygun olmayan yöntemlerin seçilmesi ile iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesi için önem arz eden risk değerlendirme raporlarının etkinliğini azaltmaktadır. Bazı durumlarda analiz tamamlandıktan sonra kullanılan yöntemin uygun olmadığı ortaya çıkmakta ve bu da zaman kaybına neden olmakta ve analistin iş yükünü artırmaktadır. Bu nedenle seçilecek yöntemin kısa sürede ve en uygun şekilde karşılaştırılması oldukça önemlidir. Yapılan bu çalışmada, biyogaz üretim tesisleri için en uygun risk analiz yöntemi Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yardımıyla belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Risk değerlendirme metodolojileri

Ülkemizde farklı yöntemler uygulanarak ve farklı sektörler için hazırlanan birçok risk analizi çalışmaları mevcuttur [23]. İşletmenin içeriğine ve analistin tecrübelerine göre risk değerlendirme çalışmalarında kullanılan nitel, nicel ve karma yöntemler (Tablo 2) bulunmaktadır [30, 31].

Tablo 2. Risk değerlendirme metotları [32]

Nitel (Kalitatif) Yöntemler	Nicel (Kantitatif) Yöntemler	Karma Yöntemler
Ön Tehlike Analizi (PHA)	L Maris Metodu	Hata Ağacı Analizi (FTA)
Ne Olursa Ne Olur? (What if..)	X Matris Metodu	Olay Ağacı Analizi (ETA)
Birincil Risk Analizi (PRA)	Fine Kinney Metodu	Balık Kılıçığı
Tehlike ve İşletilebilirlik (HAZOP)		Hata Türleri ve Etkileri (FMEA)
SWOT Analizi		Ridley
İş Emniyet Analizi (JSA)		

İş sağlığı ve güvenliği açısından, çalışma ortamının ve çalışanların sağlık ve güvenliğini korumak amacıyla mesleki risklerin değerlendirilmesinde risk değerlendirme raporlarının hazırlanması büyük önem taşımaktadır. İş kazaları ve meslek hastalıklarının neden olduğu kayıpları azaltmak için risk değerlendirilmesi, tespit edilen önemli risklerle ilgili düzeltici ve önleyici faaliyetlerin başlatılması açısından kullanılması zorunlu bir bilimsel yöntemdir [33].

Tehlikelerin ortaya çıkarılarak bu tehlikelerin sebep olabileceği risklere karşı önlem alınması, 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile zorunlu tutulmuştur [34].

Sektörün gereksinimlerini karşılayacak uygun risk değerlendirme metodunun başarılı bir şekilde kullanılması ile iş sağlığı ve güvenliğinin başarılı bir şekilde yürütülmesi ve böylelikle iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önüne geçilmesi mümkün olmaktadır [35]. Tehlikelerin belirlenmesi, tespit edilen risklerin analizi ve değerlendirilmesi, risk değerlendirmesi sonucunda gereken önlemlerin belirlenerek yerine getirilmesi, alınan önlemlerin kontrol edilmesi adımlarının sistematik olarak uygulamasından oluşan risk yönetimi, iş kazalarını önlemek için organize ve pratik bir çerçeve sağlamaktadır [36].

Risk değerlendirme metotlarında "olasılık" ve "şiddet" bileşenlerinin yanı sıra "frekans", "tespit edilebilirlik", "önceki kaza sonuçları" ve "personel sayısı" gibi bileşenler kullanılarak risk skoru (RS) hesaplanır. Bu değişkenlerin ve değişkenlerdeki değerlerin fazlalığı, metodolojilerin hassaslığını belirlemektedir [36]. L matris yönteminde olasılık ve şiddetin çarpımı RS verirken [37, 38], Fine Kinney yönteminde; frekans [39, 75], FMEA yönteminde; saptanabilirlik [37, 39], X Matris yönteminde; önceki kaza sonuçları ve personel sayısı [41] bu değişkenlere (olasılık ve şiddet) ek olarak RS hesaplanmasında kullanılmaktadır. Çalışmada uzmanlar tarafından kullanılabilirliği en yüksek olan, Fine-Kinney, Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA), L Matris ve X Matris metotları kullanılmıştır [11, 42].

Fine-Kinney yaklaşımı Avrupa'da yaygın bir uygulama olup, 2012 yılında 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun çıkmasıyla birlikte ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [43]. Riskleri derecelendirirken her bir iş bölümüne verilmesi gereken göreceli ağırlıkları gösteren bu teknikte, risk puanı hesaplanırken üç parametre dikkate alınır. Bu üç faktör bir risk puanı elde etmek için çarpılır ve daha sonra riskler sıralanarak tehlikenin derecesine göre düzeltici ve önleyici tedbirler tavsiye edilir [44]. Süreçler için etkileşimli risk hesaplaması, kontrol önlemleri için görev dağılımı, kullanılabilirlik ve daha kapsamlı saha araştırması sağladığından dolayı, en çok kullanılan yöntemlerdendir [43].

FMEA, L Matris ve Fine-Kinney teknikleri gibi yaygın olarak kullanılmaktadır [45]. Sistem ve donanım hatalarının bulunması ve bu hataların etkilerinin belirlenmesi için kullanılan FMEA, İlk kez Amerikan ordusu tarafından geliştirilmiş ve daha sonra, 1960 – 1965 yılları arasında NASA tarafından ay seyahati programlarında kullanılmıştır. Yöntemin başarısı nedeniyle, endüstriyel kullanımları günümüze kadar devam etmiştir. Bunlardan en önemlileri; 1970 ve 1975 yılları arasında ABD havacılık endüstrisi, 1972'de Ford Motor Company, 1975'te bilgisayar üretimi, 1980'de Japon NEC Şirketi, 1988 yılında Chrysler, Ford ve General Motors şeklinde sıralanabilmektedir [46]. Hataların değerlendirildiği [42] FMEA tekniği, önerilen kontrol tedbirleri ile hataları ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır [47]. FMEA'da RS olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik parametrelerinin çarpılması ile hesaplanmaktadır [48].

X Matris Metodu, bir analistin kendi başına tamamlaması zor olan karmaşık prosedürleri içeren görevler için kullanılabilen bir tekniktir [49, 50]. Yöntemde, beş yıllık süre boyunca toplanan verileri kullanarak önceki

olayların tekrar etme olasılığı ve kişi sayısı değerlendirilir [49]. Metotta şiddet değeri bulunurken olayın personele, topluma, çevreye ve ekipmana verebileceği zararlar değerlendirildiğinden dolayı şiddet skalası diğer yöntemlerden daha gerçekçidir. Değerlendirme için çarpılan ikili değişkenlerin toplamı (Olasılık*Şiddet) + (Olasılık*Önceki Kazalar) + (Önceki Kazalar*Personel Sayısı) + (Personel Sayısı*Şiddet) RS oluşturur.

Risk değerlendirme metodlarının kullanıldığı lisansüstü çalışmalara bakıldığında, L Matris yönteminin en sık kullanılan yöntem olduğu görülmüştür. Araştırılan 175 lisansüstü çalışmada L Matris yöntemi 84, Fine-Kinney yöntemi 45, FMEA yöntemi 21 kez kullanılmıştır kullanılmışlardır [18]. X Matris kullanımı için 5 yıllık kaza geçmişine ihtiyaç olması, bu yöntemin tercih edilirliliğini büyük ölçüde azaltmaktadır. Aynı zamanda, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları kullanılarak, risk analiz tekniklerinin geliştirilmeye çalışıldığı ve teknikler arasında kıyaslama yaparak önerilerin sunulduğu birçok çalışma mevcuttur [35, 42, 51-54]. Bu çalışmalar, risk değerlendirme metodlarının uygulanmasında gereken tecrübe seviyesi, metod uygulamalarındaki teknik detaylar, metodun uygulanması için takım çalışması gerektirip-gerektirmediği, ön hazırlık süreçlerinin ne kadar zaman alacağı gibi bazı kriterleri değerlendirerek en uygun metodolojinin seçilmesi amacıyla yapılmıştır [35].

Bu çalışmanın amacı, biyogaz üretim tesislerinde risk değerlendirme uygulamaları sırasında metodolojilerin avantaj ve dezavantajlarını göz önünde bulundurarak, ÇKKV yöntemleri yardımıyla en uygun risk değerlendirme metodolojisini belirlemektir. Bunun için ise sıklıkla kullanılan ÇKKV tekniklerinden Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılmıştır. Alternatiflerin kriterlere göre ağırlık puanlarını oluşturarak tutarlı bir çözüm bulmak için [55] çalışmanın parametreleri dahilinde AHS kullanılmıştır [56]. AHS tekniğinde kriterler, risk değerlendirme metodunun yapılabilmesi için gereken "Zaman", risk değerlendirme metodunun "Parametre Sayısı", "Analist Yetkinliği", "Veri Toplama Basamakları", "Sektörel Yaygınlık" ve "Analizin Başarı Oranı" olarak belirlenmiştir. Kriter ağırlıkları ise Zaman, Parametre Sayısı, Yetkinlik, Veri Toplama Basamakları, Sektörel Kullanılabilirlik, Başarı Oranı için sırasıyla; 0.25, 0.03, 0.09, 0.05, 0.15, 0.43 olarak hesaplanmıştır. Alt kriterler (alternatifler) ise "L Matris", "X Matris", "Fine Kinney" ve "FMEA" olarak belirlenmiştir. Çalışmanın iş güvenliği profesyonelleri kadar ÇKKV yöntemleri ile ilgilenen araştırmacılara da faydalı olacağı ön görülmektedir.

2.2 Analitik hiyerarşi süreci (AHS)

ÇKKV yöntemleri, karar vericilerin uğraşması gereken aynı hedefleri, karmaşık, çelişkili ve öngörülemez koşulları gösterir [57]. İstatistiksel yöntemler, matematiksel ifadeler ve problem çözme modelleri kullanılarak karar verme, en uygun alternatifini seçmenin bir yolu olarak kullanılır [58].

Tablo 3. İkili karşılaştırmada kullanılan önem dereceleri tablosu [67]

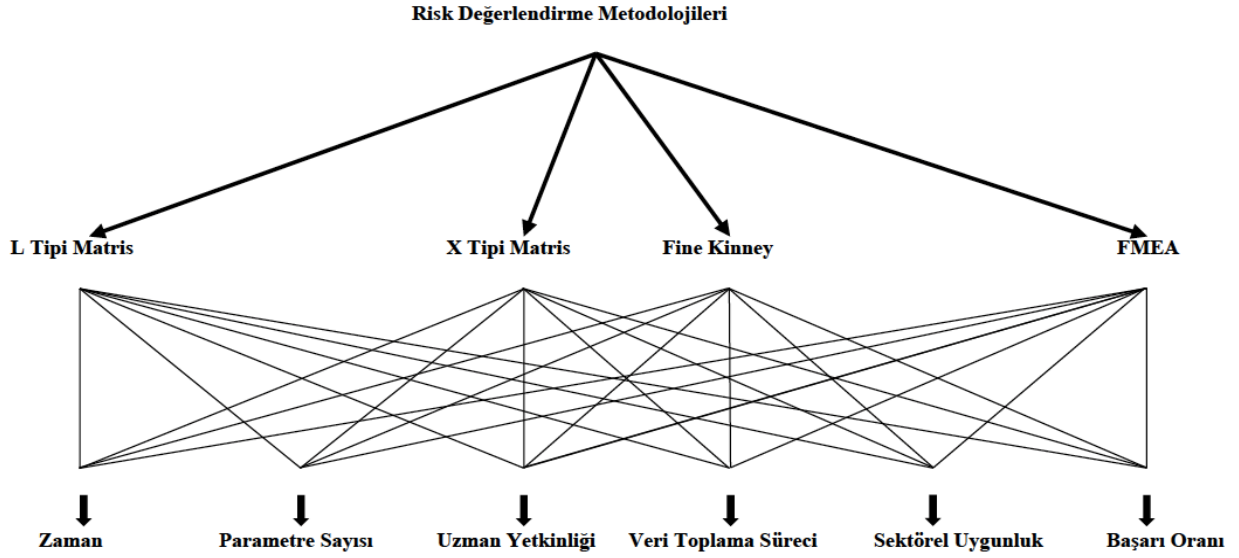
Önem Derecesi	İki Faktör Arasındaki Önemi	Açıklama
1	Eşit	Her iki faktör aynı öneme sahiptir.
3	Orta	Faktörlerden biri diğerine göre biraz daha önemlidir.
5	Kuvvetli	Faktörlerden biri diğerinden kuvvetle daha önemlidir.
7	Çok Kuvvetli	Faktörlerden biri diğerine göre yüksek derecede kuvvetle daha önemlidir.
9	Mutlak	Faktörlerden biri diğerine göre çok yüksek derecede önemlidir.

Thomas L. Saaty tarafından [59] 1970'li yıllarda literatüre kazandırılmış olan AHS, ölçülebilir ve somut olmayan kriterler veya özelliklerle yönetmek için karar teorisi ve uyumsuzluk çözümü dahil olmak üzere çeşitli alanlara uygulanan bir ölçüm teorisidir [60-62]. AHS yaklaşımı, karmaşık karar problemlerini çeşitli kriterlerle değerlendirerek çözüm bulmak için iyi bir seçenek ve birçok alanda yaygın olarak uygulanan etkili bir yöntemdir [63]. Yaklaşım, ikili karşılaştırma yoluyla, karar vericilerin her bir kıyaslama için öncelikleri (göreceli ağırlık) belirlemesine yardımcı olur [64, 65]. AHS yaklaşımı aynı zamanda, karar verme yazılımı olarak kullanıldığında özellikle kullanıcı dostudur. Bu arada, bu noktaya kadar hem AHS tekniğini hem de ÇKKV yöntemi çok az araştırmada kullanılmıştır [66].

AHS'de temel olarak hiyerarşinin kurulması ilk işlemdir. Daha sonra sırasıyla, alternatiflerin üstünlükleri belirlenir ve son olarak sayısal puanlamalar yapılarak işlem tamamlanır [57]. Hiyerarşinin oluşturulmasının ardından, Tablo 3'teki veriler kullanılarak ikili karşılaştırmada [67] kullanılan önem dereceleri belirlenir [23]. AHS yöntemi uygulamalarında daha önceden belirlenmiş formüllerden yararlanılmıştır [68, 69].

3 Bulgular ve tartışma

Risk kavramı, tehlikenin olası şiddetinin sonucunda meydana gelebilecek zarar ve kayıpların ihtimali anlamına gelmektedir. Risk değerlendirmesinde kullanılan "Kazanın meydana gelme ihtimali: Olasılık", "Kazanın gerçekleşmesi sonucunda etki: Şiddet", "Tehlikeye maruz kalma sıklığı: Frekans", "Tehlikenin fark edilebilirliği: Saptanabilirlik", "Tehlikeye maruz kalan çalışan veya kişi sayısı: Personel sayısı", "Önceki kazaların şiddet sonuçları: Önceki Kaza Sonuçları" olarak tanımlanmaktadır [36]. 6331 sayılı Kanun, işverene risk değerlendirme yapma veya yaptırma (Madde 4-1-c) sorumluluğu yüklemekte, fakat risk değerlendirme yöntemi seçiminde bir zorunluluk getirmemektedir. Yapılacak risk analizi, tehlikelerden kaynaklanacak risklerin değerlendirilmesinin, alınacak tedbirlerin termin sürelerini veya mahiyetini etkileyeceğinden dolayı, çalışmada biyogaz üreten tesisler için en uygun risk değerlendirme metodolojisini belirleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Risk değerlendirme metodolojisi seçiminde ilk olarak Şekil 1'de verilen, probleme ait bir hiyerarşik yapı oluşturulmuştur.



Şekil 1. Probleme ait hiyerarşik yapı

Hiyerarşik yapının oluşturulmasının ardından AHS yöntemi ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. AHS’de seçenekler, kriterlerin her biri için ikili olarak gruplandırılmış ve Tablo 3’teki bilgiler kullanılarak değerlendirilmiştir. Burada alternatiflerin puanlanması, literatür bilgileri ve uzman görüşleri kullanılarak yapılmıştır. AHS hesaplamaları için Microsoft Excel uygulaması kullanılmıştır.

AHS tekniği uygulanırken ilk olarak satırın “i” ve sütunun “j” ile gösterildiği ve $a_{ij} \neq 0$ olan bir A matrisi oluşturulmuştur. A matrisi, Denklem 1’de gösterilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} = 1/a_{ji} \quad (1)$$

A matrisi oluşturulmasının ardından Denklem 3 kullanılarak oluşturulan B matrisi, tüm değerler aynı aralık içinde değerlendirilerek Denklem 2 yardımıyla normalize edilmiş değerlerin oluşturulması için kullanılmıştır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Daha sonra her bir kritere göre alternatiflerin puanlarının hesaplanması, normalize edilmiş tüm kriterlerin ağırlıklarının toplamının Denklem 4’teki formül yardımıyla kriter sayısına bölünmesi ile Denklem 5’te oluşan son matris bulunmuştur.

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^n b_{ij}}{n} \quad (4)$$

$$W = [w_i]_{n \times 1} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Denklem 6 kullanılarak, kriterlerin ağırlık vektörü (C) ile alternatiflerin kriter puanları matrisi (S) çarpılmış ve sonuç olarak alternatiflerin genel puanı (P) hesaplanmıştır.

$$P = C * S = [w_i]_{n \times 1} * [w_{ij}]_{n \times n} \quad (6)$$

$$P = [P_i]_{1 \times n} \quad (7)$$

Genel puan hesaplaması bitiminde genel puanı en yüksek alternatiften başlayarak sıralama yapılır. AHS tekniğinde son olarak subjektif olan algıların tutarlılığını ve görelî ağırlıkların doğruluğu tespit etmek amacıyla, Denklem 6’da bulunan λ_{maks} (vektörün en büyük özdeğeri) ve n (toplam kriter sayısı) kullanılarak Tutarlılık İndeksi (CI) ve Denklem 9’da bulunan tutarlılık indeksi (CI) ve Rastgele Değer İndeksi (RI) kullanılarak Tutarlılık Oranı (CR) katsayıları hesaplanmıştır.

$$CI = \frac{\lambda_{maks} - n}{n - 1} \quad (8)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

Sonuçların daha güvenilir olabilmesi için tutarlılık indeksi (CI) 0.1’den küçük olmalıdır. Tutarlılık göstergeleri 1-10 boyutlu matrisler için, Tablo 4’teki gibidir.

Tablo 4. Rastgele değer indeksleri

Kriter Sayısı (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rastgele Değer İndeksi (RI)	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

AHS'nin ilk aşaması modelde kullanılan kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesidir. Kriter ağırlıklandırma yaygın olarak kullanılan metodolojilerden biri kriterlerin ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasıdır. İkili karşılaştırma matrisi bu çalışmada yalnızca kriterlerin ikili kıyaslanmasında değil, aynı zamanda alternatiflerin her bir kriterine göre karşılaştırılmasında da kullanılmıştır. **Tablo 5**'te bu çalışmada kullanılan kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi verilmektedir. Bu çalışmaya özel olarak kullanılan kriterler zaman (K1), parametre sayısı (K2), yetkinlik (K3), veri toplama basamakları (K4), sektörel (K5), başarı oranı (K6) kriterleridir. **Tablo 5**'in genel olarak yorumlanması aşağıdaki gibidir.

- K1 kriteri K2 kriteri ile kıyaslandığında K1 kriterinin K2 kriterine göre “Çok Kuvvetli Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K1 kriteri K3 kriteri ile kıyaslandığında K1 kriterinin K3 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” ile “Kuvvetli Derecede Önemli” arasında olduğu görülmektedir. K1 kriteri K4 kriteri ile kıyaslandığında K1 kriterinin K4 kriterine göre “Kuvvetli Derecede Önemli” ile “Çok Kuvvetli Derecede Önemli” arasında olduğu görülmektedir. K1 kriteri K5 kriteri ile kıyaslandığında K1 kriterinin K5 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K1 kriteri K6 kriteri ile kıyaslandığında K6 kriterinin K1 kriterinden “Orta Derecede Önemli” olduğu görülmektedir.
- K2 kriteri K3 kriteri ile kıyaslandığında K3 kriterinin K2 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” ile “Kuvvetli Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K2 kriteri K4 kriteri ile kıyaslandığında K4 kriterinin K2 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K2 kriteri K5 kriteri ile kıyaslandığında K5 kriterinin K2 kriterine göre “Kuvvetli Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K2 kriteri K6 kriteri ile kıyaslandığında K6 kriterinin K2 kriterine göre “Çok Kuvvetli Derecede Önemli” ile “Mutlak Derecede Önemli” arasında olduğu görülmektedir.
- K3 kriteri K4 kriteri ile kıyaslandığında K3 kriterinin K4 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K3 kriteri K5 kriteri ile kıyaslandığında K5 kriterinin K3 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K3 kriteri K6 kriteri ile kıyaslandığında K6 kriterinin K3 kriterine göre “Kuvvetli Derecede Önemli” ile “Çok Kuvvetli Derecede Önemli” arasında olduğu görülmektedir.
- K4 kriteri K5 kriteri ile kıyaslandığında K5 kriterinin K4 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” olduğu görülmektedir. K4 kriteri K6 kriteri ile kıyaslandığında K6 kriterinin K4 kriterine göre “Çok Kuvvetli Derecede Önemli” olduğu görülmektedir.

- K5 kriteri K6 kriteri ile kıyaslandığında K6 kriterinin K5 kriterine göre “Orta Derecede Önemli” ile “Kuvvetli Derecede Önemli” olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Kriterlerin ikili karşılaştırılması

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1.00	7.00	4.00	6.00	3.00	0.33
K2	0.10	1.00	0.25	0.33	0.20	0.13
K3	0.30	4.00	1.00	3.00	0.33	0.17
K4	0.20	3.00	0.30	1.00	0.33	0.14
K5	0.30	6.00	3.00	4.00	1.00	0.25
K6	3.00	8.00	6.00	7.00	4.00	1.00

Tablo 5'e göre kriterlerin karşılaştırılmasının **Denklem 8**'e göre hesaplanan CI değeri 0.086 hesaplanırken, **Tablo 4**'e göre RI değeri de 1.24 olarak seçilmiştir. Bu iki veriye göre CR değerinin 0.07 olduğu ortaya çıkmış ve bu değer (CR) 0.1'den küçük olduğu için yapılan işlemler istatistiksel olarak tutarlı ve anlamlıdır. Tutarlılık ve anlamlılık işlemlerine göre kriterlerin kullanılabilir ağırlıkları **Tablo 6**'da gösterilmektedir. Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde görüş alınan uzmanların değişmesi halinde hesaplamaların da değişeceği unutulmamalıdır.

Tablo 6. Kriterlerin ağırlıklandırılmış puanları

Kriterler	Ağırlıklı Puanlar
Zaman	0.25
Parametre Sayısı	0.03
Yetkinlik	0.09
Veri Toplama Basamakları	0.05
Sektörel	0.15
Başarı Oranı	0.43

Tablo 7'de zaman kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi verilmektedir. **Tablo 7**'ye göre hesaplanan CI değeri 0.01 hesaplanırken ve kriter sayısı 4 olduğundan dolayı RI değeri 0.90 (**Tablo 4**) olarak seçilmiştir. Bu iki veriye göre CR değerinin 0,01 olduğu ortaya çıkmış ve bu değer (CR) 0.1'den küçük olduğu için yapılan işlemler istatistiksel olarak tutarlı ve anlamlıdır. Zaman kriterine göre en kısa sürede hesaplanarak en iyi değere sahip olan alternatif 0.146 puan ile L matris (Y1) olarak belirlenmiştir. Diğer alternatifler ise sırasıyla, Y3 alternatifi olan Fine Kinney (0.059), Y4 alternatifi olan FMEA (0.031) ve Y2 alternatifi olan X matristir (0.017).

Tablo 7. Zaman kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırılması ve anlamlılığı

	Y1	Y2	Y3	Y4
Y1	1.00	7.00	3.00	5.00
Y2	0.14	1.00	0.25	0.50
Y3	0.33	4.00	1.00	2.00
Y4	0.20	2.00	0.50	1.00
Toplam	1.67	14.00	4.75	8.50

Tablo 8'de parametre sayısı kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi verilmektedir. **Tablo 8'e** göre hesaplanan CI değeri 0.01 hesaplanırken, **Tablo 4'e** göre RI değeri de 0.90 olarak seçilmiştir. Bu iki veriye göre CR değerinin 0.01 olduğu ortaya çıkmış ve bu değer (CR) 0.1'den küçük olduğu için yapılan işlemler istatistiksel olarak tutarlı ve anlamlıdır. Parametre sayısı kriterine göre en az kullanılarak hesaplanarak en iyi değere sahip olan alternatif 0.016 puan ile L matris (Y1) olarak belirlenmiştir. Diğer alternatifler ise sırasıyla, A2 alternatifi olan X matris (0.006), Y3 alternatifi olan Fine Kinney (0.006) ve Y4 alternatifi olan FMEA'dır (0.002).

Tablo 8. Parametre sayısına kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırılması ve anlamlılığı

	Y1	Y2	Y3	Y4
Y1	1.00	3.00	3.00	6.00
Y2	0.33	1.00	1.00	3.00
Y3	0.33	1.00	1.00	3.00
Y4	0.16	0.33	0.33	1.00
Toplam	1.83	5.33	5.33	13.00

Tablo 9'da yetkinlik kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi verilmektedir. **Tablo 9'a** göre hesaplanan CI değeri 0.01 hesaplanırken, **Tablo 4'e** göre RI değeri de 0.90 olarak seçilmiştir. Bu iki veriye göre CR değerinin 0.01 olduğu ortaya çıkmış ve bu değer (CR) 0.1'den küçük olduğu için yapılan işlemler istatistiksel olarak tutarlı ve anlamlıdır. Yetkinlik kriterine göre en az yetkinlik gerektirdiği için en iyi değere sahip olan alternatif 0.050 puan ile L matris (Y1) olarak belirlenmiştir. Diğer alternatifler ise sırasıyla, Y3 alternatifi olan Fine Kinney (0.020), Y4 alternatifi olan FMEA (0.010) ve Y3 alternatifi olan X matristir (0.006).

Tablo 9. Yetkinlik kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırılması ve anlamlılığı

	Y1	Y2	Y3	Y4
Y1	1.00	7.00	3.00	5.00
Y2	0.14	1.00	0.25	0.50
Y3	0.33	4.00	1.00	2.00
Y4	0.20	2.00	0.50	1.00
Toplam	1.67	14.00	4.75	8.50

Tablo 10'da veri toplama basamaklarına göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi verilmektedir. **Tablo 10'a** göre hesaplanan CI değeri 0.01 hesaplanırken, **Tablo 4'e** göre RI değeri de 0.90 olarak seçilmiştir. Bu iki veriye göre CR değerinin 0.01 olduğu ortaya çıkmış ve bu değer (CR) 0.1'den küçük olduğu için yapılan işlemler istatistiksel olarak tutarlı ve anlamlıdır. Veri toplama basamakları kriterine göre en az veri gerektirdiği için en iyi değere sahip olan alternatif 0.030 puan ile L matris (Y1) olarak belirlenmiştir. Diğer alternatifler ise sırasıyla, Y3 alternatifi

olan Fine Kinney (0.012), Y4 alternatifi olan FMEA (0.006) ve Y2 alternatifi olan X matristir (0.003).

Tablo 10. Veri toplama basamakları kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırılması ve anlamlılığı

	Y1	Y2	Y3	Y4
Y1	1.00	7.00	3.00	5.00
Y2	0.14	1.00	0.25	0.50
Y3	0.33	4.00	1.00	2.00
Y4	0.20	2.00	0.50	1.00
Toplam	1.67	14.00	4.75	8.50

Tablo 11'de veri toplama basamaklarına göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi verilmektedir. **Tablo 11'e** göre hesaplanan CI değeri 0.004 hesaplanırken, **Tablo 4'e** göre RI değeri de 0.90 olarak seçilmiştir. Bu iki veriye göre CR değerinin 0.004 olduğu ortaya çıkmış ve bu değer (CR) 0.1'den küçük olduğu için yapılan işlemler istatistiksel olarak tutarlı ve anlamlıdır. Sektörel kullanım kriterine göre en fazla sektörde kullanılabildiği için en iyi değere sahip olan alternatifler 0.068 puan ile L matris (Y1) ve X matristir (Y2). Diğer alternatifler ise sırasıyla, Y3 alternatifi olan Fine Kinney (0.038), Y4 alternatifi olan FMEA (0.011) olarak belirlenmiştir.

Tablo 11. Sektör kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırılması ve anlamlılığı

	Y1	Y2	Y3	Y4
Y1	1.00	1.00	2.00	6.00
Y2	1.00	1.00	2.00	6.00
Y3	0.50	0.50	1.00	4.00
Y4	0.16	0.16	0.25	1.00
Toplam	2.66	2.66	5.25	17.00

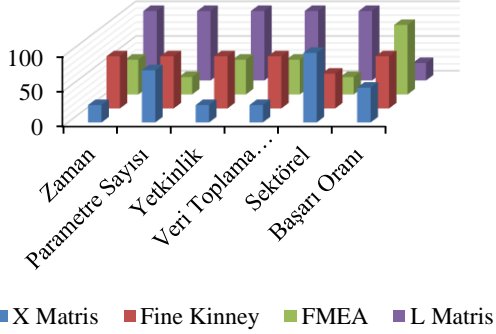
Tablo 12'de başarı oranı göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi verilmektedir. **Tablo 12'ye** göre hesaplanan CI değeri 0.02 hesaplanırken, **Tablo 4'e** göre RI değeri de 0.90 olarak seçilmiştir. Bu iki veriye göre CR değerinin 0.02 olduğu ortaya çıkmış ve bu değer (CR) 0.1'den küçük olduğu için yapılan işlemler istatistiksel olarak tutarlı ve anlamlıdır. Başarı oranı kriterine göre en fazla başarılı sonuç veren alternatif 0.546 puan ile FMEA (Y4) olarak belirlenmiştir. Diğer alternatifler ise sırasıyla, Y3 alternatifi olan Fine Kinney (0.373), Y2 alternatifi olan X matris (0.146) ve Y1 alternatifi olan L matristir (0.074).

Tablo 12. Başarı oranı kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırılması ve anlamlılığı

	Y1	Y2	Y3	Y4
Y1	1.00	0.50	0.20	0.14
Y2	2.00	1.00	0.33	0.20
Y3	5.00	3.00	1.00	0.50
Y4	7.00	5.00	2.00	1.00
Toplam	15.00	9.50	3.53	1.84

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre "Zaman" için CI=0.01, "Parametre Sayısı" için CI=0.02, "Yetkinlik" için CI=0.01, "Veri Toplama Basamakları" için CI=0.01,

“Sektörel Uygulanabilirlik” için $CI=0.06$, “Başarı Oranı” için $CI=0.02$ olarak belirlenmiştir. AHS yöntemi ile hesaplanan kriterlerin alternatiflere göre ağırlıkları, Tablo 5’te gösterilmektedir.



Şekil 2. Kriterlere göre alternatiflerin ağırlıkları

Şekil 2 incelendiğinde, veri toplama basamaklarının azlığı, parametre sayısının en az olduğu matris olması ve buna bağlı olarak fazla yetkinlik istemeyen [34] bir metot olduğu için kısa zamanda yapılan L Matris, bu özelliklerinden dolayı AHS yönteminde yüksek puanlar almıştır. Ancak bu avantajlarının yanı sıra çalışmada değerlendirilen 4 yöntem içinde en düşük “Başarı Oranı” puanına sahip olan yöntem olması nedeniyle toplam puanını düşüklüğü nedeniyle 3. sırada yer almıştır. Başarı puanının düşük olması, metodun uygulanması aşamasında analizi yapan analist tercihlerinin büyük değişikliklere yol açabilecek olmasından kaynaklanmaktadır [70, 71]. X Matris yönteminde, 5 yıllık geçmiş kaza incelemesi yapılması nedeniyle [72], veri toplama basamaklarının en zor olduğu [36] ve buna bağlı olarak, çalışmada değerlendirilen 4 matris arasında hazırlık aşaması en uzun süren matris olduğu ortaya konulmuştur. Aynı zamanda X Matris, analizi yapacak kişi yetkinliğinin diğer yöntemlerden fazla olması gerektiğinden [72] “Yetkinlik” açısından en düşük puana sahiptir. Bu dezavantajlarının yanında bu metot, L Matris ile sektörel uygulanabilirlik açısından ilk sırada yer almaktadır. Değerlendirme kriterleri açısından yüksek bir puana sahip olan Fine Kinney metodu, tüm kriterler değerlendirmelerinde “Başarı Oranı” dahil olmak üzere “Zaman”, “Parametre Sayısı”, “Yetkinlik” ve “Veri Toplama Basamakları” sıralamalarında ikinci sırayı alarak toplam puanlamada benzer şekilde ikinci sırada yer almıştır. Başarı oranı en yüksek olan FMEA metodu, parametre sayısının fazlalığı [73] ve sektörel uygulanabilirlik açısından en düşük puana sahip olarak dördüncü sırada, “Zaman”, “Yetkinlik” ve “Veri Toplama Basamakları” kriterlerinde ise üçüncü sırada yer almış bir yöntem olmasına rağmen, başarı oranı ve toplam puanları en yüksek olan metot olduğu ortaya çıkmıştır.

4 Sonuçlar

Biyogaz üreten tesislerde iş sağlığı ve güvenliği açısından uygun bir çalışma ortamı sağlanabilmesi çok önemlidir. Güvenli bir çalışma ortamı için yapılması gereken en önemli işlerden biri de risk değerlendirme

çalışmalarıdır. Genel olarak risk değerlendirme yapılırken seçilen metodoloji, analistin tercihleri ve tecrübesiyle belirlenmektedir. Bu tercih genellikle hem fazla tecrübe gerektirmediğinden hem de kısa sürede yapılması nedeniyle L Matristen yana kullanılmaktadır. Mevzuat içerisinde hangi tehlike sınıfına hangi metodolojinin seçileceğine dair bir sınırlama olmaması bu matrisin kullanılmasını engellememektedir. Fakat L matriste kullanılan değişkenlerin azlığı nedeniyle, bu yöntem kullanılarak hazırlanan risk değerlendirme çalışmalarının başarıya ulaşabilmesi, analistin tecrübesi, ön görüşü ve dikkati sayesinde olabilmektedir. Bu durum da ortamda bulunan tehlike kaynaklarının değerlendirilmesini ve bu tehlikelerin oluşturacağı risklerin tanımlanmasını güçleştirmekte ve hata yapma olasılığını artırmaktadır. Bu nedenle bu çalışma ile risk değerlendirme yapan analistin tercihlerine bırakılmadan, metodolojilerin avantaj ve dezavantajları değerlendirilerek ve yöntemlere sayısal değerler verilerek en uygun risk değerlendirme yöntemi belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında AHS ile elde edilen sonuçlar “Başarı Oranı” dahil edilmeden değerlendirildiğinde, en kısa sürede yapılması, değerlendirilmesi gereken parametre sayısının en az olması, en az yetkinlik gerektiren metot olması ve sektörel uygunluğu en iyi olan metotlardan olması gibi avantajlarından dolayı L Matris yöntemi en yüksek puanla (0.310) ilk sırada yer almaktadır. Ancak, kazaların engellenmesi ve meslek hastalıklarının önlenmesi amacıyla tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işletmeler için “Başarı Oranı” kriterinin ön planda tutulduğu yöntemin seçilmesi gerekmektedir. L Matris yönteminin analist dostu görünmesinin yanında, yapılacak olan küçük hatalar nedeniyle büyük kazalar ve meslek hastalıkları yaşanabileceğinden, L Matris, tek başına kullanılmamalı ve başka bir metot ile desteklenmelidir. Dezavantajları ve avantajları göz önüne alınarak “Başarı Oranı” kriteri hesaplandığında biyogaz tesislerinde, FMEA risk değerlendirme yönteminin en yüksek başarıya sahip olan yöntem olduğu ve 0.605 puanla ilk sırada yer aldığı görülmüştür. Analiste birçok avantajlar sunan L Matrisin “Başarı Oranı” en düşük olan yöntem olması nedeniyle diğer avantajlarına rağmen 0.384 puanla 3. sırada yer almaktadır. Fine Kinney metodu FMEA’nın ardından yüksek puanlar alarak 0.507 puanla 2. sırada yer almıştır. “Zaman”, “Parametre Sayısı”, “Yetkinlik” ve “Veri Toplama Basamakları” kriterlerinden aldığı düşük puanlar nedeniyle X Matris 0.246 puanla son sırada yer almıştır. Bu sonuçlar ile biyogaz tesislerinde FMEA ilk tercih edilebilecek yöntem olurken, Fine Kinney ikinci sırada tercih edilebilecek yöntem olarak değerlendirilmiştir. X Matris yönteminin 5 yıllık kaza geçmişi verilerine ihtiyaç duyması, yetkinliğin fazla olması gerekliliğinden dolayı kullanımının zor olduğu ve başarı oranının FMEA ve Fine Kinney Metotlarına göre düşük olması nedeniyle uygulanmasının zor olduğu anlaşılmıştır. Aynı zamanda, L Matris kullanımının da diğer iki yönetime göre biyogaz tesisleri için tek başlarına uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Çalışmalarda yardımlarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Cihan ÖZGÜR'e teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] E. Kapluhan, Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanımı. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 5 (15), 97-125, 2014. <https://doi.org/10.14781/mcd.98631>.
- [2] A. Erensoy ve N. Çek, Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Saf Kültür Mikroorganizmaları ve Genel Özellikleri. *European Journal of Science and Technology*. 18, 109-117, 2020. <https://doi.org/10.31590/ejosat.669787>.
- [3] S. Üçok, Sebze ve meyve pazar atıklarının biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [4] İ.T. Yılmaz ve M.A. Gümüş, Research on biogas-diesel dual fuel diesel engine. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (3), 919-927, 2017. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.337645>.
- [5] G. Koçar, A. Eryaşar, Ö. Ersöz, Ş. Arıcı, G. Bayrakçı ve E. Aytav, Kırsal Kesim Biyogaz Teknolojilerinin Geliştirilmesi ve Yaygınlaştırılması Gündümlü Teknoloji Geliştirme Projesi Proje No: 07/Dpt/003, 2013.
- [6] M. Koyuncu ve H. Akgün, Çiftlik Hayvanları ve Küresel İklim Değişikliği Arasındaki Etkileşim. *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32 (1), 151-164, 2017.
- [7] H. Şenol, E.A. Elibol ve Ü. Açikel, Biyogaz üretimi için Ankara'nın başlıca organik atık kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 15-28, 2017. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.339261>.
- [8] BEPA, Türkiye Biyokütle Potansiyeli Atlası. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Erişim:29.11.2022. <https://bepa.enerji.gov.tr/>, 2022.
- [9] T. Seadi, D. Rutz, H. Prassl, T. Finsterwalder, M. Kottner, S. Volk and R. Janssen, *Biogas Handbook*, University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, 2008.
- [10] E.N. Bilici, İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinin biyogaz tesisinde uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [11] N. Mutlu ve S. Altuntaş, Türkiye'de 1974-2016 Yıllarında İş Sağlığı ve Güvenliği Alanında Yapılan Lisansüstü Tezlerin Profili. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7 (2), 509-535, 2017.
- [12] E.N. Bilici, İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinin biyogaz tesisinde uygulanması. Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye, 2019.
- [13] İTST, İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği. (İlk Yayın Tarihi: 26.12.2012 RG:28509; En Son Değişiklik Tarihi: 18.03.2022, RG: 31782), 2022.
- [14] C. Göreke, ve C. Karagüzel, Biyogazdan Enerji Üreten Bir Tesisin Entegre Risk Analiz Yöntemi ile Risk Değerlendirmesi. *Journal of Scientific Reports-B*. 2021.
- [15] M. Ulu and S. Birgün, A New Model Proposal for Occupational Health and Safety. In *Digitizing Production Systems*, 347-356, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90421-0_29.
- [16] G. Çağlar ve M. Demirbilek, Krom Cevher Üretimi ve Hazırlık Galerisi Yapım İşleri Risk Değerlendirmesi. *Journal of Occupational Health and Safety Academy*. 5 (2), 66-75, 2022. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.1128841>.
- [17] A. Ürünveren ve İ. Erol, Yüksek Basıncılı Boru Hat Montajında L-Matris Yöntemi ile Risk Değerlendirmesi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 6 (1), 1-13, 2022. <https://doi.org/10.33720/kiugd.1032441>.
- [18] Ö. Akkoyun ve M. Okur, Türkiye'de Lisansüstü Çalışması Olarak Yapılan İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 5 (2), 109-120, 2021. <https://doi.org/10.33720/kisugd.927755>.
- [19] H. Altundağ ve M. Koçak, Tersanelerde Yangın Güvenliği ve Risk Analizi. *Dirençlilik Dergisi*, 1025747, 5 (2), 245-263, 2021. <https://doi.org/10.32569/resilience.1025747>.
- [20] M.O. Engür, Ormanda Yüksekte Çalışma: "Tırmanıcı/Budayıcı" Orman Çalışanlarının Güvenlik Performansının Geliştirilmesine Yönelik Önlemler. *Ergonomi*, 4 (1), 22-34, 2021. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.882021>.
- [21] M. Minaz, K. Ak ve İ.Z. Kurtoğlu, Alabalık Yetiştiricilik Tesislerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Analizi. *İş Sağlığı ve Güvenliği Akademik Dergisi*, 4 (3), 14-21, 2021. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.989585>.
- [22] K.K. Göncü ve O. Çetin, Hastanelerde İş Sağlığı ve Güvenliği Süreçleri: Patoloji Laboratuvarı Risk Değerlendirme Çalışması. *Social Sciences Research Journal*, 10 (2), 462-474, 2021.
- [23] C. Özgür, Dezenfeksiyon Ünitesi Risk Analizi: İçme Suyu Arıtma Tesisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (1), 16-22, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.741014>.
- [24] B. Gür, Ş. Yavuz, A.D. Çakır ve D.A. Köse, Güneş Enerjisi Santralinde Matris Risk Analiz Yöntemiyle Tehlike ve Risklerin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23, 497-511, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.881614>.
- [25] K. Uray, Demiryolu Bakım İşlerinde Matris Yöntemi Kullanılarak Risklerin Olası Etkilerinin Belirlenmesi.

- Afet ve Risk Dergisi, 4 (2), 121-134, 2021. <https://doi.org/10.35341/afet.975612>.
- [26] Ş. Ünverdi ve S. Çetinyokuş, Bir Kamu Kurumunda Bulunan Asbest Uygulama Merkezi ve SEM Laboratuvarında L Tipi Matris Yöntemi ile Risk Değerlendirmesi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 5 (2), 99-107, 2021. <https://doi.org/10.33720/kisgd.977714>.
- [27] H.G. Aytepe, O. Dalyan, H. Dalyan ve M. Pişkin, Bazı Balıkçı Teknelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği. *İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi*, 4 (3), 1-13, 2021. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.1020191>.
- [28] İ. Ateş, S. Salman and Y. Bozkurt, Assessment of Hazards and Risks in Glass Products Production and Processing Business During The Pandemic. *NÖHÜ Müh. Bilim. Dergisi*. 10 (2), 855-865, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.874295>.
- [29] S. İrmak, H. Peker, N. Ersen ve İ. Akyüz, Artvin'deki Orman Ürünleri İşletmelerinin İş Sağlığı ve Güvenliğinin Risk Değerlendirilmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 22 (2), 278-291, 2021. <https://doi.org/10.24011/barofd.1039991>.
- [30] Ö. Akkoyun ve Ğ. Ekinci, Farklı ISG-Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Bir Yeraltı Maden İşletmesinde Karşılaştırmalı Uygulanması ve Yöntem Önerisi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 60 (4), 181-189, 2021. <https://doi.org/10.30797/madencilik.937920>.
- [31] G.E. Atakol, A. Kahriman, S. Bağdatlı ve B. Furat, Yerüstü Patlatmasında İş Güvenliği Risk Değerlendirme Yöntemi: Kirnati-Gürcistan Hidroelektrik Santrali Projesi Mühendislik Uygulamaları. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 3 (2), 113-127, 2019. <https://doi.org/10.33720/kisgd.502426>.
- [32] H. Kantarcıoğlu, A. Kantarcıoğlu ve H. Dinç, Sağlık Kurumlarında İş Sağlığı ve Güvenliği: Kamu Hastanelerinde Risk Değerlendirme Yöntemlerine Yönelik Bir İnceleme. *Sağlık Akademisyenleri Dergisi*, 7 (1), 61-66, 2020. <https://doi.org/10.26450/jshsr.2401>.
- [33] M. Özgür, Metal Sektöründe Risk Analizi Uygulanması, İş Müfettişliği Yardımcılığı Etüdü, 2013.
- [34] A. Aker ve T.Ö. Özçelik, Metal Sektöründe 5x5 Matris ve Fine-Kinney Yöntemi ile Risk Değerlendirmesi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 4 (1), 65-75, 2020. <https://doi.org/10.33720/kisgd.630799>.
- [35] A. Adem, İş Sağlığı ve Güvenliğinde Kullanılan Risk Analizi Tekniklerinin Değerlendirilmesi İçin Bir Rehber Önerisi. *Politeknik Dergisi*. 25 (3), 1319-1328, 2022. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1114897>.
- [36] Ö. Kaçar ve A.R. Motorcu, Aynı Tehlike ve Riskler için Farklı Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması: Otomotiv Bakım Onarım Servisi için Örnek Bir Çalışma. *Conference: 5.Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, sayfa 257-267. İstanbul/Türkiye, 2021.
- [37] M.F. Ak, Comparison of Risk Assessment Methods within the Scope of Occupational Safety in the Construction Sector. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 272-282, 2020. <https://doi.org/10.31590/ejosat.670906>.
- [38] H. Bayraktar, E. Sahtiyancı ve A. Kuru, Risk Değerlendirme Matris Yöntemi Kullanarak Okullarda Deprem Kaynaklı Yapısal Olmayan Risklerin Olası Etkilerinin Belirlenmesi. *Afet ve Risk Dergisi*, 2 (2), 128-152, 2019. <https://doi.org/10.35341/afet.624745>.
- [39] A. Özkan, İki farklı iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme metodolojisinin bir işletmede uygulamalı karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye*, 2019.
- [40] C.G. Feryal, K.D. Atalay ve E. Eraslan, HTEA Temelli CRITIC Yöntemi ile Bir Devlet Hastanesinde Risk Değerlendirme Uygulanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 176-187, 2018. <https://doi.org/10.21923/jesd.349717>.
- [41] T. Pırl ve R. Erol, Risk Analizi: Bir Otomotiv Fabrikasında Gerçekleştirilen X Tipi Karar Matrisi Uygulanması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (3), 91-98, 2016.
- [42] N.F. Karakurt, İ. Hekimoğlu ve A. Güneri, Best Worst Metodu ile İnşaat Sektöründe Risk Değerlendirmesine Yeni Bir Yaklaşım. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9 (4), 1141-1154, 2021. <https://doi.org/10.21923/jesd.770437>.
- [43] B. Eskiömeroğlu, Tam teşekküllü spor komplekslerinin risk analizlerinin fine kinney ve 5x5 l matris yöntemleri ile yapılarak karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye*, 2018.
- [44] J. Uzundede, Otomobil bakım servislerinde iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin sağlanmasına yönelik bir örnek alan incelemesi. *Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye*, 2017.
- [45] M.E. Devren, Asansör sistemlerinde fmea ve fine-kinney metodlarının risk değerlendirmelerinin karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye*, 2016.
- [46] D. Durhan, Hata türü etkileri analizi (fmea) ve bir uygulama. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye*, 2006.
- [47] M. Turan, Transformator üreten bir firmada bulanık fmea ile risk analizi uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye*, 2018.
- [48] H. Durmuş, Ö. Yurtsever ve B. Yalçın, Bir Çay Fabrikasında Fine-Kinney ve FMEA Yöntemleri ile Risk Değerlendirmesi. *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.*, 33 (2), 287-298, 2021. <https://doi.org/10.7240/jeps.814798>.
- [49] İ. Topal, Risk Değerlendirmesi Metotları. *İzmir, Bayraklı: dataakademi*, 2017.
- [50] C.A. Reis, Agregat üretiminde kullanılan patlayıcı maddelerin uygulamasında iş sağlığı ve güvenliğinin değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*


- Esenyurt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [51] A.Ç. Boyacı, M.B. Solmaz ve M. Kabak, Kararsız Bulanık Dilsel Terim Setleri ile İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Süreci İçin Model Önerisi: Plastik Sektöründe Bir Uygulama. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 36 (2), 1041-1054, 2021. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.632323>.
- [52] H. Erdal, İş Sağlığı ve Güvenliği İçin DEMATEL-ARAS Tabanlı Risk Değerlendirme Metodolojisi ve Bir Uygulama. MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi, 8 (2), 1831-1853, 2019. <https://doi.org/10.33206/mjss.465681>.
- [53] P. Toktaş ve G.F. Can, Şantiyelerin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Risk Düzeylerine Göre KEMIRA-M Yöntemi ile Sıralanması. Ergonomi, 1 (3), 123-136, 2018. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.480397>.
- [54] B. Şişman, Risk Evaluating By Fuzzy Ahp And Fuzzy Vikor Methods In Failure Mode And Effects Analysis For Automotive Sector. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 9 (18), 234-250, 2017. <https://doi.org/10.20875/makusobed.302942>.
- [55] R.W. Saaty, The Analytic Hierarchy Process—What It Is and How It Is Used. Math Modell, 9, 161-176, 1987. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- [56] K. Ransikarbum, R. Pitakaso, N. Kim and J. Ma, Multicriteria Decision Analysis Framework for Part Orientation Analysis in Additive Manufacturing. J Comput Des Eng, 8 (4), 1141-1157, 2021. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab037>.
- [57] N. Ömürbek, M. Karaatlı, ve T. Yetim, Analitik Hiyerarşi Sürecine Dayalı TOPSIS ve VIKOR Yöntemleri ile ADİM Üniversitelerinin Değerlendirilmesi. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Dr. Mehmet YILDIZ Özel Sayısı, 189-207, 2014.
- [58] K.B. Atıcı ve A. Ulucan, Enerji Projelerinin Değerlendirilmesi Sürecinde Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımları ve Türkiye Uygulamaları, H.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 27 (1), 161-186, 2009.
- [59] M. Bertolini, and M. Bevilacqua, A Combined Goal Programming-AHP Approach to Maintenance Selection Problem. Reliability Engineering and System Safety. 91, 839-848, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.08.006>.
- [60] T. Dar, N. Rai and A., Bhat, Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones Using Analytical Hierarchy Process (AHP). Geology, Ecology, and Landscapes, 22 (3), 1–16, 2020. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1726562>.
- [61] H.J. Mohammed, I.A.M. Al-Jubori and M.M. Kasim, Evaluating Project Management Criteria Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process. AIP Conference Proceedings, 2138 (1), 400181– 400186, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5121097>.
- [62] S. Hashemi, A. Marzuki, H.J. Mohammed and S. Kiumarsi, The Effects of Perceived Conference Quality on Attendees. Behavioural Intentions. Anatolia, 31 (3), 360–375, 2020. <https://doi.org/10.1080/13032917.2020.1729215>.
- [63] G. Baffoe, Exploring the Utility of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Ranking Livelihood Activities for Effective and Sustainable Rural Development Interventions in Developing Countries. Evaluation and Program Planning, 72, 197–204, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2018.10.017>.
- [64] H.J. Mohammed, M.M. Kasim and I.N. Shaharane, Evaluation of e-learning Approaches Using AHP-TOPSIS Technique. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 10 (1), 7–10, 2018.
- [65] P.D. Marinis and G. Sali, Participatory analytic hierarchy process for resource allocation in agricultural development projects. Evaluation and Program Planning, vol. 80, 101793, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2020.101793>.
- [66] H.J. Mohammed and H.A. Daham, Analytic Hierarchy Process for Evaluating Flipped Classroom Learning. Computers, Materials & Continua, 2021. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.014445>.
- [67] Y. Wind and T.L. Saaty, Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process, Management Science, 26, 641-658, 1980. <https://doi.org/10.1287/mnsc.26.7.641>.
- [68] A. Özbek, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Excel ile Problem Çözümü, Seçkin Akademik ve Mesleki Yayınlar, Ankara, 2017.
- [69] B.F. Yıldırım ve E. Önder, Operasyonel, Yönetmel ve Stratejik Problemlerin Çözümünde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, Dora Yayıncılık, Bursa, 2018.
- [70] G.S. Tantoğlu, Mermer işletme sektörünün iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi ve 3t risk değerlendirme yöntemi ile bir uygulama çalışması yapılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [71] S. Önder, M. Önder ve F. Çiçek, Hata Türü ve Etkileri Analizi Yöntemi ile Bir Mermer Fabrikası'nda Risk Değerlendirmesi. Yer Altı Kaynakları Dergisi, 22, 13-24, 2022.
- [72] P. Tekin ve R. Erol, Risk Analizi: Bir Otomotiv Fabrikasında Gerçekleştirilen X Tipi Karar Matrisi Uygulaması. KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (3), 91-98, 2016. <https://doi.org/10.17780/ksujes.79525>.
- [73] D. Topuksak, 3T risk değerlendirmesi yönteminin etkinliğinin artırılmasına yönelik bir yaklaşım. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [74] M. Narlı, E. Göçmen and O. Derse, Risk Assessment Using a Novel Hybrid Method: a Case Study at The Biochemistry Department. Hacettepe Journal of Health Administration, 24 (3), 571-588, 2021.





Görüntü artırma tekniklerinin cilt kanseri türleri üzerinde evrimsel sinir ağları ile sınıflandırma başarılarının karşılaştırılması

Comparison of the classification performance of image augmentation techniques with convolutional neural networks on skin cancer types

Ömer Özcan^{1,*} , Muhammed Karaaltun² 

¹ Selçuk Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 42630, Konya, Türkiye

² KTO Karatay Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 42050, Konya, Türkiye

Öz

Derin öğrenme yaklaşımlarından evrimsel sinir ağları algoritması ile görüntü veri setleri üzerinde sınıflandırma çalışmaları yaygın olarak tıp ve tarım gibi birçok alanda başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Ancak, görüntü veri setleri içerisinde bulunan sınıfların örnek sayıları dengesiz olduğu durumlarda bu algoritmanın sınıflandırma başarımı olumsuz yönde etkilenmektedir. Genelde çoğunluk sınıfının aksine azınlık sınıfı(ları) evrimsel sinir ağları algoritması tarafından iyi bir şekilde öğrenilmemektedir. Bunun gibi durumlarda aşırı örnekleme yöntemlerine başvurmak başarılı sonuçlar alınmasını sağlamaktadır. Aşırı örnekleme yöntemleri ile azınlık sınıfı(ları) örneklerinin sayısı artırılarak çoğunluk sınıfının örnek sayısına yakın ya da eşit olmaktadır. Bu çalışmada literatürde sıkça kullanılan; yer değiştirme, döndürme, rastgele silme, gürültü ekleme, resimlerin karıştırılması, çekirdek filtreleri, çekişmeli üretici ağlar, çevirme, özellik uzayı dönüşümü, kırma ve renk uzayı dönüşümü aşırı örnekleme yöntemleri Ham10000 veri seti üzerinde uygulanmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen sonuçlara göre sınıflandırma başarısı açısından aşırı örnekleme yöntemleri karşılaştırılmıştır. Üç farklı evrimsel sinir ağları modellerinden; ResNet50, DenseNet201, MobileNet ile elde edilen sınıflandırma sonuçlarına göre doğruluk açısından ResNet50 modelinde gürültü ekleme yöntemi 0.967, DenseNet201 modelinde renk uzayı dönüşümü yöntemi 0.965 ve MobileNet modelinde ise Resimlerin karıştırılması yöntemi 0.974 sınıflandırma başarısı değeri ile diğer aşırı örnekleme yöntemlerinden daha iyi bir sonuç elde etmiştir.

Anahtar kelimeler: Aşırı örnekleme, Derin öğrenme, Evrimsel sinir ağı, Görüntü, Yetersiz örnekleme.

1 Giriş

Evrimsel Sinir Ağı (ESA), hiyerarşik özellik öğrenme yetenekleri sayesinde hastalıkların tahmin edilmesi, el yazısı tanıma, bilgisayar görmesi, görüntülerin sınıflandırılması alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1]–[4]. Son yıllarda ImageNet veri seti üzerinde evrimsel sinir ağı tabanlı yöntemler ile yapılan sınıflandırma çalışmaları başarılı sonuçlar vermiştir [5], [6]. Her ne kadar ImageNet

Abstract

Classification studies on image data sets with convolutional neural networks algorithm, which is one of the deep learning approaches, are widely performed successfully in many fields such as medicine and agriculture. However, in cases where the sample numbers of the classes in the image datasets are imbalanced, the classification performance of this algorithm is negatively affected. In general, unlike the majority class, the minority class(es) are not well learned by the convolutional neural network algorithm. In such cases, applying oversampling methods provides successful results. With oversampling methods, the number of minority class(s) samples is increased, making it close to or equal to the sample number of the majority class. In this study, translation, rotation, random erasing, noise injection, mixing of images, kernel filters, generative adversarial networks, flipping, feature space transformation, cropping and color space transformation oversampling methods frequently used in the literature were applied on the Ham10000 dataset. According to the results obtained as a result of the study, oversampling methods have been compared in terms of classification performance. From three different convolutional neural network models, according to the classification results obtained with ResNet50, DenseNet201, MobileNet, in terms of accuracy, the noise injection method in the ResNet50 model was 0.967, the color space transformation method in the DenseNet201 model was 0.965, and in the MobileNet model, the mixing of images method had a classification performance value of 0.974 which was better than the other oversampling methods.

Keywords: Convolutional neural network, Deep learning, Image, Oversampling, Undersampling.

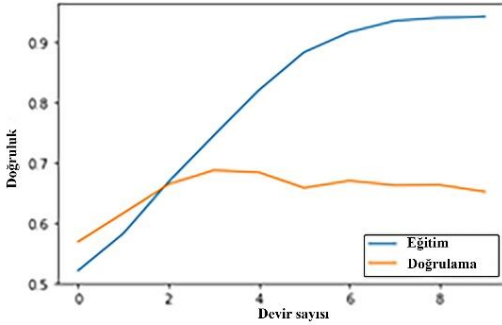
gibi örnek sayısının çok fazla olduğu veri setlerinde evrimsel sinir ağları başarılı sonuçlar verse de örnek sayısının yetersiz olduğu dengesiz veri setlerinde sınıflandırma başarımının düştüğü gözlemlenmektedir [7]. Evrimsel sinir ağı gibi derin öğrenme tabanlı yaklaşımlarda örnek sayısının az olduğu durumlarda ya da örneklerin birbirine çok benzediği durumlarda aşırı öğrenme sorunu meydana gelmektedir [8]. Aşırı öğrenme durumu meydana

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oozcan@selcuk.edu.tr (Ö. Özcan)

Geliş / Received: 24.03.2023 Kabul / Accepted: 24.08.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1270466

geldiğinde evrimsel sinir ağı yüksek eğitim oranlarına ulaşmakta, ancak ağı daha önce karşılaşmadığı verilerle test edildiğinde başarısız sonuçlar vermektedir [9], [10]. Şekil 1’de örnek bir aşırı öğrenme durumu verilmiş olup eğitim doğruluğu ve test verisi ile doğrulama oranlarına bakıldığında ağı yüksek oranlarda eğitilmiş olmasına rağmen az sayıda örnek ile eğitildiğinden dolayı doğrulama aşamasında düşük sonuçlar verdiği görülmektedir [11], [12].

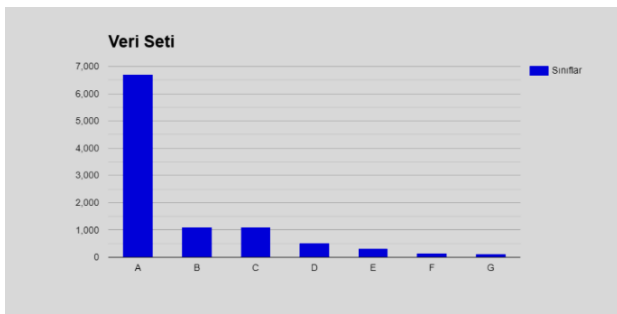


Şekil 1. Aşırı öğrenme durumu

Dengesiz veri setlerindeki bir başka problem ise azınlık sınıfları ile çoğunluk sınıflarının örnek sayıları arasında çok fazla fark olabilmesidir. Örnek bir dengesiz veri setinde %95 oranında sağlıklı, %5 oranında hastalıklı örneklerin bulunduğu durumda hastalıklı örneklerin tamamının yanlış tahmin edildiği durumda bile doğruluk oranı %95 olarak hesaplanmaktadır.

Dengesiz veri setlerinin sebep olduğu sorunların çözümü için sunulan çözümler yetersiz örnekleme ve aşırı örnekleme olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir.

Yetersiz örnekleme yönteminde dengesiz veri setlerindeki çoğunluk sınıflarının örnek sayıları azınlık sınıfları ile eşitlenerek indirgenmektedir.



Şekil 2. Örnek dengesiz veri seti

Yetersiz örnekleme yöntemi eğer azınlık sınıflarının örnek sayıları ağı eğitimi için yeterli ise dengesiz veri seti probleminde bir çözüm olabilir [13]. Ancak azınlık sınıflarının örnek sayıları Şekil 2’deki gibi ağı eğitimi için yeterli değilse bu tür veri setlerinde yetersiz örnekleme yapmak sınıflandırma başarımını olumsuz etkileyecektir [14]. Dengesiz veri setlerinde azınlık sınıflarının örnek sayıları sınıflandırma için yetersiz olduğu durumlarda görüntü artırma yöntemleri kullanılarak dengesiz veri seti

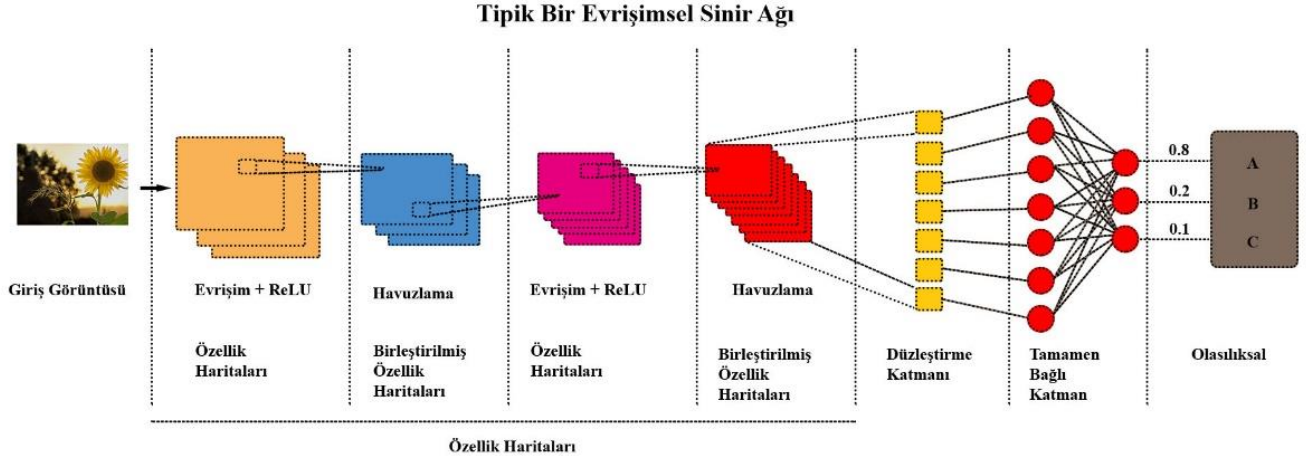
dengeli hale getirilmektedir. Veri setini dengeli hale getirebilmek için kernel filtreleri, renk uzayı dönüşümleri, rastgele silme, geometrik dönüşümler, resimlerin karıştırılması gibi temel görüntü işleme yöntemleri kullanıldığı gibi sinirsel sitil aktarımı ve çekişmeli üretici ağlar ile görüntü artırma gibi derin öğrenme yaklaşımları da kullanılmaktadır [7], [15], [16]. Dengesiz görüntü veri setlerinin sebep olduğu sınıflandırma problemlerinin çözümünde görüntü artırma yöntemlerinin daha başarılı sonuçlar vermesini sağlamak için transfer öğrenme yöntemleri ile de desteklenmektedir. Transfer öğrenmede, ImageNet gibi geniş veri setleri ile önceden eğitilmiş olan ağlar, görüntü artırma ile dengeli hale getirilmiş görüntü veri setlerinin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [17], [18]. Transfer öğrenme yöntemlerinden ResNet, VGG, DenseNet, EfficientNet, AlexNet modellerinin görüntü artırma yöntemleri ile dengeli hale getirilmiş dengesiz veri setleri üzerinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [19]–[24].

Yapılan çalışmada, literatürde yaygın kullanılan 11 farklı görüntü artırma tekniği tespit edilerek cilt kanseri veri seti üzerinde her bir tekniğin bireysel başarısı evrimsel sinir ağları kullanılarak test edilmiştir. Görüntü artırma tekniklerinin başarısının ölçülmesinde DenseNet50, MobileNet ve DenseNet201 önceden eğitilmiş evrimsel sinir ağı yapıları kullanılmıştır. Yapılan testlerde farklı ağ yapılarında farklı sonuçlar elde edilmiştir. ResNet50 ile yapılan testlerde en yüksek doğruluk oranına 0.967 ile gürültü ekleme yöntemi, DenseNet201 ile yapılan testlerde en yüksek doğruluk oranına 0.965 ile renk uzayı dönüşümü yöntemi, MobileNet ile yapılan testlerde en yüksek doğruluk oranına 0.974 ile resimlerin karıştırılması yöntemi en yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır. Her ne kadar kararsız bir durum gibi görüne de her bir ağ yapısına ait karşılaştırma tabloları incelendiğinde bu üç görüntü artırma tekniğinin ilk üç sırada oldukları görülmektedir.

Bu çalışma; giriş, geçmiş çalışmalar, evrimsel sinir ağı, görüntü artırma teknikleri, deneysel çalışmalar ve sonuç şeklinde organize edilmiştir.

2 Geçmiş çalışmalar

Evrimsel sinir ağları ile yapılan sınıflandırma çalışmalarında verilerin ön işleme tabi tutulması, verinin ham haline göre sınıflandırma başarımını etkilemektedir [25]. Sınıflandırma başarımını etkileyebilecek sorunlardan bir tanesi de sınıfların örnek sayıları arasındaki aşırı dengesizliklerdir [26], [27]. Veri setlerindeki sınıfların örnek sayılarının dengelenebilmesi için genel olarak aşırı örnekleme ve yetersiz örnekleme başlıkları altında pek çok çözüm önerisi sunulmuştur. Yuan ve ark. geliştirmiş oldukları yöntemde, görüntü içerisindeki kenarların dış büyüklüğünü kullanan bir aşırı örnekleme yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemi veri setleri üzerinde test ederek etkinliğini ortaya koymuşlardır [28]. Jiang ve ark. etiketsiz sınıflar üzerinde aşırı örnekleme yapabilmek için bir kümeleme yöntemi önermişlerdir. Yaptıkları çalışmalarında aynı zamanda çoğunluk sınıflarının örnek sayıları da azaltılmıştır. Geliştirdikleri yöntemini başarımını 44 farklı veri seti üzerinde test etmişlerdir [29].



Şekil 3. Tipik bir evrişimsel sinir ağı [30]

Pek çok çalışmada aşırı örnekleme yöntemi uygulanırken, örnekleme işlemi sadece azınlık sınıfları içerisinde alınan örneklerle yapılmıştır. Temraz ve Keane ise geliştirmiş oldukları yöntemde, k-NN algoritması yardımı ile sadece azınlık sınıfları değil çoğunluk sınıflarındaki örnekleri de kullanan bir aşırı örnekleme yöntemi geliştirmişlerdir [31]. Engelmann ve Lessmann, geliştirmiş oldukları aşırı örnekleme yönteminde çekışmeli üretici ağları (Generative Adversarial Networks-GAN) kullanarak azınlık sınıfları için sentetik örnekler üretmişlerdir. Geliştirilen yöntemi farklı veri setleri üzerinde test ederek yöntemin başarımını test etmişlerdir [32]. Sınıf dengesizliği problemini çözmek için kullanılan yöntemlerden bir kısmı da yetersiz örnekleme konu başlığı altında incelenmektedir. Yetersiz örnekleme yöntemlerinde sınıf dengesizliği probleminin çoğunluk sınıflarının örnek sayıları azaltılarak çözümler geliştirilir. Dai ve ark. geliştirmiş oldukları yetersiz örnekleme yönteminde çoğunluk sınıflarının örnekleri arasındaki benzerlikleri hesaplamışlardır. Örnekler arasındaki benzerlik değerlerine göre bazı örnekleri eleyerek çoğunluk sınıflarının örnek sayılarını azaltmışlardır [27]. Xue ve ark. yapmış oldukları çalışmalarında optimize edilmiş olasılık temelli bir yetersiz örnekleme tekniği geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri tekniği, veri setine uygulayarak sınıf dengesizliği probleminin olumsuz etkilerinin çözümüne karşı test etmişlerdir [33].

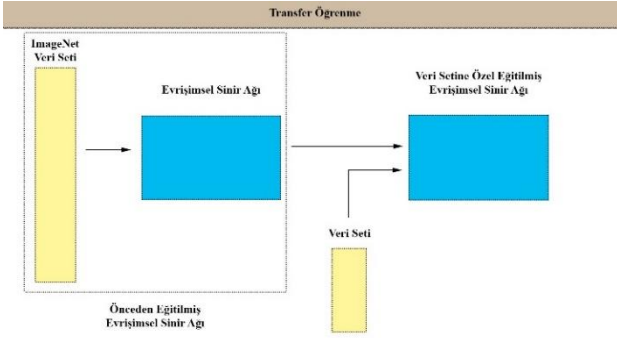
Nanni ve ark. yapmış oldukları çalışmalarında çevirme, döndürme, yer değiştirme ve kırpma görüntü artırma yöntemlerini VIR, BARK, GRAV ve POR veri setlerine uyguladıktan sonra ResNet50 yapısındaki evrişimsel sinir ağı üzerinde sınıflandırmaya olan etkilerini test etmişlerdir [34]. Perez ve Wang yapmış oldukları çalışmalarında çekışmeli üretici ağlar (GAN) ve döngüsel çekışmeli üretici ağlar (CycleGAN) görüntü artırma teknikleri ile yer değiştirme, kırpma, döndürme, çevirme ve çarpıtma görüntü artırma tekniklerini karşılaştırmışlardır. Bu teknikleri MNIST veri seti üzerinde uyguladıktan sonra VGG16 yapısındaki evrişimsel sinir ağı üzerinde sınıflandırma üzerine etkilerini test etmişlerdir [35]. Bu çalışmada ise, yer değiştirme, döndürme, rastgele silme, gürültü ekleme,

resimlerin karıştırılması, çekirdek filtreleri, çekışmeli üretici ağlar, çevirme, özellik uzayı dönüşümleri, kırpma ve renk uzayı dönüşümleri olmak üzere 11 farklı görüntü artırma tekniği karşılaştırılmıştır. ResNet50, DenseNet201 ve MobileNet önceden eğitilmiş ağları üzerinde sınıflandırma performansları karşılaştırma metriği olarak kullanılmıştır.

3 Evrişimsel sinir ağı (ESA)

Evrişimsel sinir ağı, genellikle görüntüler üzerine uygulanan yapay sinir ağı tabanlı bir derin öğrenme yaklaşımıdır [36]. Bu yapıda, giriş görüntülerinden özellik çıkarım işlemleri ve sadeleştirme işlemleri yapan katmanlar ile birlikte bir de yapay sinir ağı katmanı bulunur [30], [37]. Evrişimsel sinir ağı yapısında bulunan yapay sinir ağı katmanının amacı giriş görüntülerinin doğru şekilde sınıflandırılmasıdır [38]. Yapay sinir ağı, resimlerin sınıflandırılması çalışmalarında yıllardır yaygın şekilde kullanılan bir algoritma olmasına rağmen giriş verilerinin büyük olması durumlarında çok fazla donanımsal kaynağa ihtiyaç duyar [39]. Bu sebeple giriş görüntülerinin, öncelikle özellik çıkarım yöntemleri kullanılarak indirgenmesi ve sınıflandırma başarısını arttıracak şekilde ayırt edici özelliklerin ortaya çıkarılması gerekir [40]. Ancak evrişimsel sinir ağı, yapısında bulundurduğu katmanlar sayesinde özellik çıkarım ve indirgeme işlemlerini dahili olarak yaptığından dolayı giriş görüntüleri üzerinde herhangi bir ön işleme ihtiyaç duymaz [41]. Şekil 3'te tipik bir evrişimsel sinir ağı görülmektedir. Bu ağda giriş görüntüsü, evrişim (Convolution) ve havuzlama (Pooling) katmanlarından geçirilerek özellikleri çıkarılır ve indirgenir. Ardından tamamen bağlı katmana aktarılmak üzere düzeltilir. Tamamen bağlı katman, her bir giriş görüntüsü için olasılıksal sonuçları hesaplar ve çıkış katmanında bulunan aktivasyon fonksiyonu yardımıyla bir çıkış üretir [30], [37]. Evrişim katmanındaki ReLU ise ağın eğitimini olumsuz yönde etkileyen negatif değerleri elimine etmek için kullanılan bir fonksiyondur. Evrişimsel sinir ağı, evrişim, birleştirme ve tamamen bağlı katmanlarında üretilen çıkışlara göre her bir katmanda ayrı ayrı öğrenilme yeteneklerine sahiptir [42]. Evrişimsel sinir ağı yapısının

eğitilebilmesi için çok sayıda görüntüye ihtiyaç duyulur [18]. Her problem için çok sayıda görüntü içeren bir veri seti bulunamayabilir ya da büyük veri setleri ile ağı eğitmek çok miktarda zaman alıyor olabilir. Bu tür durumlarda evrişimsel sinir ağı yapısının ImageNet gibi büyük görüntü veri setleri ile eğitildiği transfer öğrenme yöntemleri kullanılarak hem eğitim zamanından tasarruf edilir hem de yetersiz sayıda görüntü içeren ya da dengesiz veri setleri üzerindeki sınıflandırma başarımı artırılır [17], [19], [24].

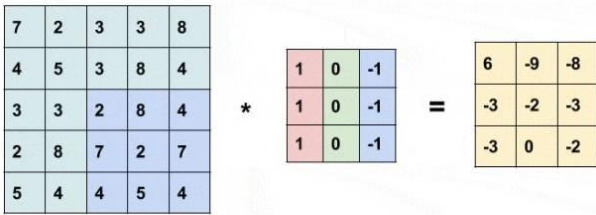


Şekil 4. Transfer öğrenme [43]

Şekil 4'te tipik bir transfer öğrenme modeli görülmekte olup literatürde AlexNet, SqueezeNet, VGG16, VGG19, GoogLeNet, ResNet50, ResNet101, InceptionV3 ve InceptionResNetV2 transfer öğrenme modelleri görülmektedir [44].

3.1 Evrişim katmanı

Bu katman, evrişimsel sinir ağı yapısında görüntünün ilk işlendiği katmandır. Görüntüler, piksellerin sayısal değerlerinden oluşan matrisler olarak ele alınır ve özellik haritaları elde edilir. Bu katmanda, görüntüye ait matrisler üzerinde kendisinden daha küçük bir filtre matrisi gezdirilerek özellik haritaları hesaplanır. Bu katmandaki öğrenme işlemi, görüntü üzerinde gezdirilen filtrelerin parametrelerinin sürekli güncellenmesi ile gerçekleşir [45].



Şekil 5. Evrişim katmanı

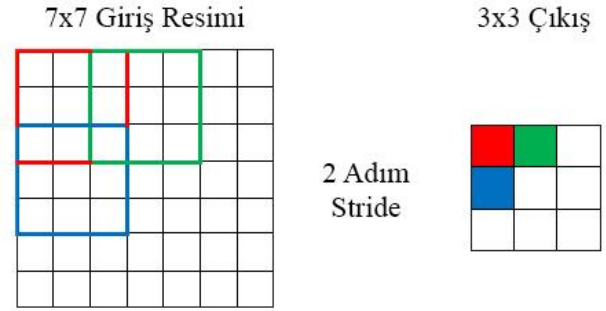
Şekil 5'te örnek bir evrişim katmanı işlemi görülmektedir. Filtre matrisi görüntüye ait matris üzerinde gezdirilerek görüntüye ait özellikler matris şeklinde elde edilir. Yapılan geri bildirimler vasıtasıyla filtre üzerindeki parametreler güncellenerek bu katmanın öğrenmesi sağlanır.

3.2 Adım (Stride)

Adım, evrişim katmanındaki filtrelerin orijinal görüntü üzerinde kaç piksel kaydırılacağını belirleyen parametredir [46]. Adım değerinin büyütülmesi özellik haritalarının küçülmesine sebep olacaktır. Adım (Stride) işlemi Şekil 6'da görülmektedir.

3.3 Dolgu (Padding)

Bir görüntü evrişim işlemine tabi tutulduğunda boyutu küçülmekte olup bu durum iki farklı olumsuzluğa sebep olmaktadır. Birincisi, küçülen görüntülerdeki bilgi ve detaylar azalmaktadır. İkincisi ise kenar ve köşelerde bulunan piksellerin çıktıya olan etkisinin azalmasıdır [46]. Bu durumda çözüm olarak giriş görüntüsünün dış çeperi 0 değerleri ile doldurularak dolgu (Padding) işlemi yapılır. Yapılan dolgu (Padding) işleminin evrişimsel sinir ağlarında bahsedilen sorunlarla ilgili başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [47].



Şekil 6. Adım işlemi

3.4 ReLU (Rectified linear unit)

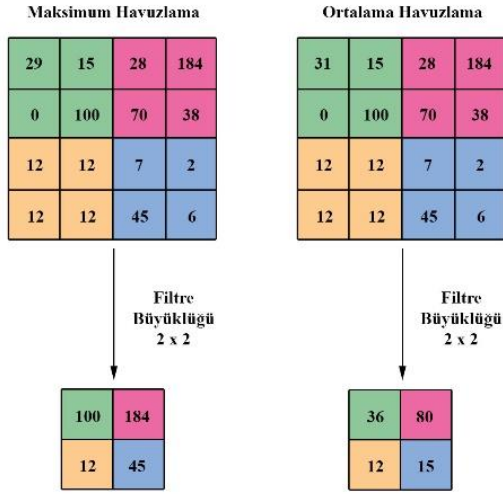
Evrişimsel sinir ağı içerisindeki süreçlerde ağı negatif değerleri öğrenmesini engellemek için kullanılan doğrusal olmayan bir fonksiyondur [48]. ReLU fonksiyonu Denklem (1)'de görülmektedir.

$$f(x) = \max(0, x) \quad (1)$$

3.5 Havuzlama (Pooling) katmanı

Havuzlama katmanı giriş görüntülerine ait matrislerin indirgenmesi amacıyla kullanılır. Bu sayede ağı ihtiyaç duyduğu işlem gücü azalır hem de sınıflandırma başarımına katkısı düşük olan özellikler elimine edilir [49].

Havuzlama katmanında yaygın olarak maksimum havuzlama (Max Pooling) ve ortalama havuzlama (Average Pooling) yöntemlerinden biri kullanılmasına rağmen literatürde çok sayıda havuzlama yöntemi önerilmiştir [50]. Maksimum havuzlama yönteminde seçilen filtre boyutuna (Pool Size) göre filtre içerisinde kalan sayıların en büyüğü alınarak giriş görüntüsü indirgenir. Ortalama havuzlama yönteminde seçilen filtre boyutuna (Pool Size) göre filtre içerisinde kalan sayıların ortalaması alınarak giriş görüntüsü indirgenir [49]. Bahsedilen havuzlama yöntemleri Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Havuzlama katmanı

3.6 Düzleştirme katmanı

Evrişimsel sinir ağının bir parçası olan özellik çıkarım işlemleri bittikten sonra görüntülerin yine bu ağın bir parçası olan yapay sinir ağına aktarılabilmesi için tek boyutlu vektörlere dönüştürülmesi gerekmektedir [51]. Görüntülerin tek boyutlu vektörlere dönüştürüldüğü katmana düzleştirme katmanı adı verilmektedir.

3.7 Tamamen bağlı katman

Giriş görüntüleri üzerinde özellik çıkarım işlemleri tamamlandıktan sonra elde edilen özellik haritaları düzleştirildikten sonra bu katmana gelir. Bu katman, evrişimsel sinir ağı içerisinde bulunan bir yapay sinir ağı yapısıdır [37]. Şekil 3'te görülen bu yapı giriş olarak aldığı özellik haritalarına göre çıkışlar üretir. Bu çıkışlar Softmax gibi aktivasyon fonksiyonları ile işlenerek nihai çıktı elde edilir [52].

4 Görüntü artırma teknikleri

Dengesiz veri setlerindeki azınlık sınıflarının örnek sayılarını artırarak veri setlerini dengeli hale getirebilmek için bu çalışmada kullanılan teknikler Tablo 1'de liste halinde verilmiştir [7].

4.1 Çevirme (Flipping)

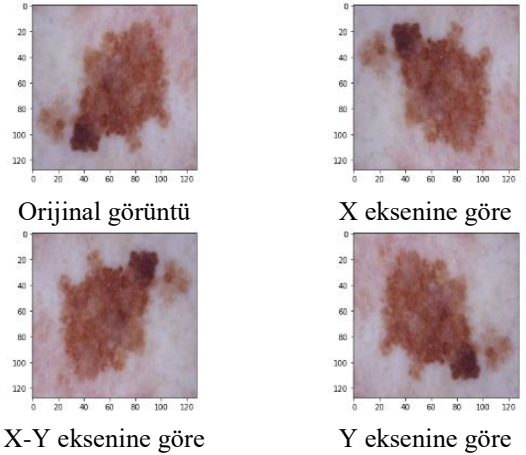
Bu işlem, görüntülerin yatayda ya da dikeyde bir eksene göre çevrilmesi işlemidir. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemde görüntünün çevrilmiş hali kendisine çok benzediği durumlarda sınıflandırma başarımına düşük olmaktadır [53]. Ayrıca el yazısı gibi görüntülerde çevrilmiş hali başka bir karaktere benzediği durumlarda sınıflandırma hatalarına sebep olabilmektedir [7].

$$(x, y) \rightarrow (x \text{ de\u0131işim}, y \text{ de\u0131işim}) \quad (2)$$

Şekil 8'de örnek bir çevirme işlemi görülmektedir. Bu yöntemde görüntüye ait pikseller Denklem (2)'ye göre herhangi bir eksende aynı uzaklıktaki başka bir konuma taşınır.

Tablo 1. Görüntü artırma teknikleri

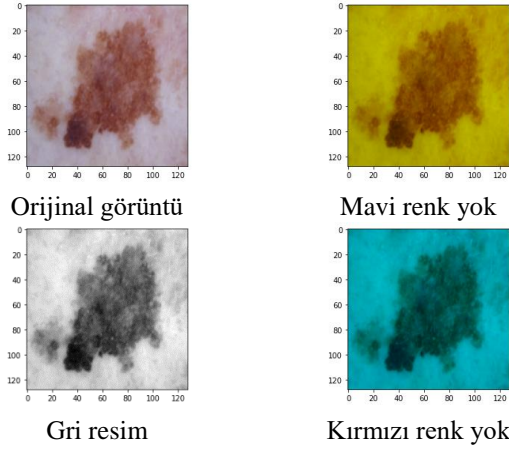
Nu.	Adı	Açıklama
1	Çevirme	Görüntünün bir eksene göre çevrilmesidir
2	Renk dönüşümleri	Görüntü renk kanallarında değişiklikler yapılmasıdır
3	Kırpma	Görüntünün bir bölümünün kırılmasıdır
4	Döndürme	Görüntünün herhangi bir açıda döndürülmesidir
5	Yer de\u0131iştirme	Görüntünün herhangi bir yöne doğru hareket ettirilmesidir
6	Gürültü ekleme	Görüntüye gürültü eklenmesidir
7	Çekirdek filtreleri	Görüntüye filtre matrisleri uygulanmasıdır
8	Resimlerin karıştırılması	Görüntülerin karıştırılmasıdır
9	Rastgele silme	Görüntünün bir bölümünün silinmesidir
10	Özellik dönüşümleri	Görüntü üzerinde vektörel işlemler yapılmasıdır
11	Çekişmeli ağlar	Derin öğrenme ile sentetik görüntü üretimidir



Şekil 8. Görüntülerin çevrilmesi yöntemi ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

4.2 Renk uzayı dönüşümleri (Color space transformations)

Dijital görüntüler genellikle boyutlar (genişlik, yükseklik) ve renk kanallarından (Kırmızı, Yeşil, Mavi) oluşan bir yapıda kodlanırlar. Bu renk kanalları literatürde red, green ve blue kelimelerinin kısaltması olan RGB kısaltması ile yer alır.



Şekil 9. Renk uzayı dönüşümleri ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

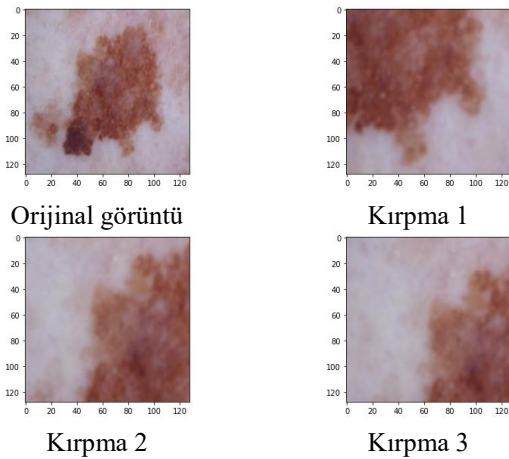
Renk kanalları üzerinde gerçekleştirilen değişikliklerle yapılan görüntü artırma işlemi oldukça pratiktir. Tek kanaldan oluşan bir resme istenilen değerlerden oluşan yeni renk kanalları eklenebilir ya da görüntünün sahip olduğu kırmızı, yeşil, mavi kanallarından bir tanesini diğerlerinden izole ederek hızlı bir şekilde görüntü artırma yapılabilir [7]. Yine kanallar üzerinde yapılabilecek bir başka işlem de görüntünün saydamlığını artırarak ya da azaltarak görüntü artırma yapılabilir [54].

$$Gray = \frac{R + G + B}{3} \quad (3)$$

Ayrıca, Denklem (3)'e göre 3 kanallı red, green, blue (RGB) görüntüleri Gri seviye görüntüleriye dönüştürülerek görüntü artırma yapılabilir [55]. Örnek renk uzayı dönüşümleri Şekil 9'da görülmektedir.

4.3 Kırpma (Cropping)

Bu yöntemde görüntünün herhangi bir bölgesinden rastgele bir bölüm seçilerek alınır ve veri setine yeni üretilmiş sentetik görüntü olarak eklenir.



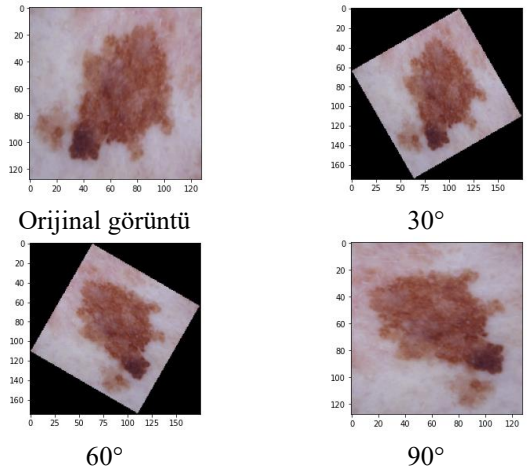
Şekil 10. Kırpma yöntemi ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

Şekil 10'da görülmekte olan kırpma işlemi yaygın şekilde kullanılan görüntü artırma yöntemlerinden bir tanesidir. Ancak orijinal görüntüdeki boş bölgelerin kesilip alınarak sentetik görüntü olarak kullanılması durumlarında aşırı öğrenme sorunlarına sebep olabilmektedir [56].

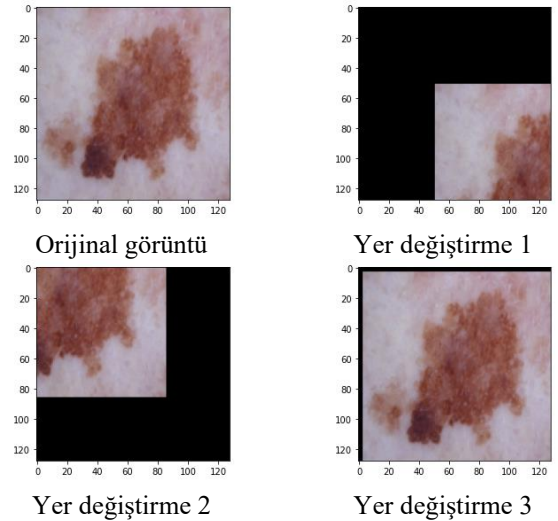
4.4 Döndürme (Rotation)

Bu yöntemde, görüntünün Denklem (4)'e göre sağa ya da sola doğru 1° ile 359° arasında döndürülmesi ile elde edilen yeni görüntüler görüntü artırmada kullanılır. Görüntü artırma amaçlı yaygın şekilde kullanılan bu yöntemde, görüntünün döndürülmüş hali kendisi ile aynı ise sınıflandırma başarımına etkisi düşük olmaktadır [57]. Şekil 11'de görülen bu yöntemde görüntünün döndürüldüğünde farklı görünmesi ya da farklı eksenlerde döndürüldüğünde farklı görüntüye dönüşmesi başarılı sonuçlar verebilmektedir [57].

$$\begin{aligned} (x, y) &\rightarrow (X, Y) \\ X &= \cos(\text{angle}) * x - \sin(\text{angle}) * y \\ Y &= \sin(\text{angle}) * x + \cos(\text{angle}) * y \\ \text{angle} &= \{1^\circ - 359^\circ\} \end{aligned} \quad (4)$$



Şekil 11. Döndürme yöntemi ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri



Şekil 12. Yer değiştirme yöntemi ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

4.5 Yer değiştirme (Translation)

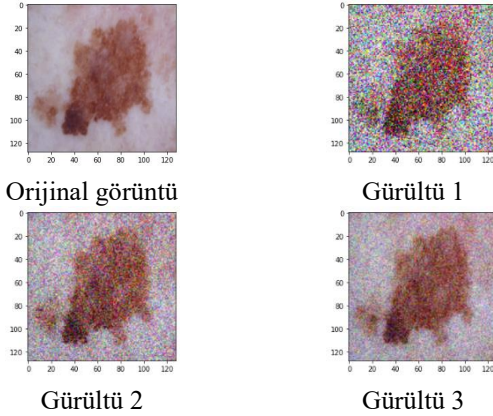
Görüntülerin sağa, sola, aşağı ya da yukarı doğru kaydırılmaları görüntü artırma için oldukça kullanışlı olmaktadır. Özellikle veri seti ortalanmış görüntülerden oluştuğu durumlarda bu işlem görüntü artırma için iyi sonuçlar verebilmektedir [58].

$$\begin{aligned} (x, y) &\rightarrow (X, Y) \\ X &= x + dx \\ Y &= y + dy \end{aligned} \quad (5)$$

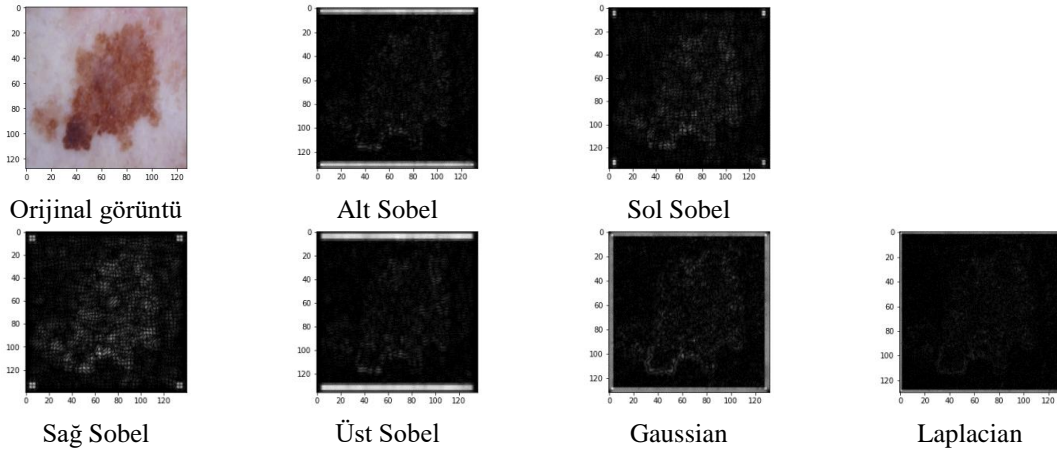
Denklem (5)'te görüntü içerisindeki (x, y) konumunda bulunan bir objenin, yeni konumu olan (X, Y) konumuna taşınması işlemi görülmektedir. (dx, dy) ise farklı yönleri ifade etmektedir. Yer değiştirme işlemi Denklem (5)'e göre yapılmakta olup Şekil 12'de örnek yer değiştirme işlemleri görülmektedir.

4.6 Gürültü ekleme (Noise injection)

Gürültü ekleme görüntülere rastgele değerlerle ya da Gaussian Filtresi gibi filtrelerle gürültü eklenmesi işlemidir. Görüntülere gürültü eklenerek görüntü artırma yapılması derin öğrenme algoritmalarının başarımını arttırmaktadır [59]. Ancak aşırı gürültü eklenmesi ya da orijinal görüntünün gürültü eklendiğinde ayırt edici özelliklerini kaybetmesi gibi durumlarda sınıflandırma başarımını olumsuz yönde etkilemektedir [59].



Şekil 13. Gürültü ekleme yöntemi ile elde edilen sentetik görüntü rnekleri



Şekil 15. Çekirdek filtreleri ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

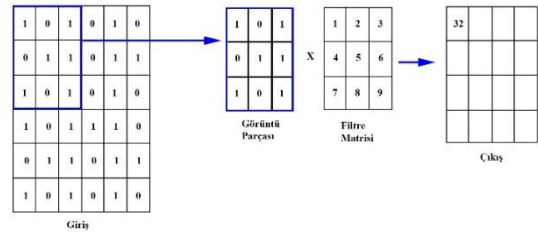
Şekil 13'te gürültü eklenmiş örnek görüntü ve gürültü eklenmiş hali görülmektedir.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

Gaussian Filtresi görüntülere Denklem (6)'ya göre eklenmektedir. Denklemde sigma (σ); tüm piksellerin standart sapmasını, (x, y) değerleri; piksellerin konumlarını, e değeri; Euler sayısını ifade etmektedir.

4.7 Çekirdek filtreleri (Kernel filters)

Çekirdek filtreleri görüntü işleme yöntemleri arasında görüntüleri keskinleştirmek ya da bulanıklaştırmak için kullanılan popüler yöntemlerden biridir. $N \times N$ matrisler halinde görüntüler üzerinde çeşitli filtreler kaydırılarak görüntü bulanıklaştırılır ya da keskinleştirilir. Ek olarak, görüntülerin keskinleştirilmesi görüntü artırma yöntemlerinde kullanıldığında detayların ne çıkmasını sağlayabilir. Yapılan çalışmalarda çekirdek filtrelerinin sınıflandırmaya olumlu yönde etkileri görülmüştür [60].

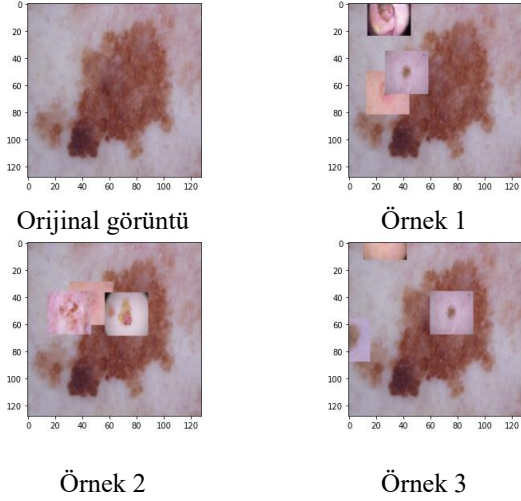


Şekil 14. Çekirdek filtresi

Çekirdek filtreleri evrişimsel sinir ağı katmanları içerisinde de bulunduğundan ağın başarımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir [7]. Literatürde alt (Bottom) sobel, sol (Left) sobel, sağ (Right) sobel, st (Top) sobel, gaussian, laplacian çekirdek filtreleri yaygın Şekilde kullanılan filtrelerdir [61], [62]. Bu filtreler Şekil 14'te ki yönteme göre görüntülere uygulanarak Şekil 15'teki sonuçlar elde edilmektedir.

4.8 Resimlerin karıştırılması (Mixing images)

Görüntülerin rastgele karıştırılması görüntü artırma yöntemleri açısından mantıksız bir işlemdir. Ancak geliştirilen yöntemlerle resimlerin karıştırılması verimli bir yönteme dönüşebilmektedir [63].



Şekil 16. Resimlerin karıştırılması yöntemi ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

Bu yöntemde, görüntü artırma yapılacak azınlık sınıfı örneklerinin tamamı ya da bir kısmı karıştırılarak sentetik görüntüler elde edilir. Yapılan çalışmada sentetik örnekler her sınıf kendi içerisinde karıştırılarak elde edilmiştir. Şekil 16'da örnek görüntüler görülmektedir.

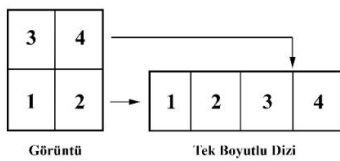
4.9 Rastgele silme (Random erasing)

Bu yöntemde, görüntü üzerinde belirlenen $N \times M$ boyutlarındaki yama 0- 255 arasındaki piksel değerleriyle, ortalama piksel değerleriyle ya da rastgele piksel değerleriyle maskelenir. Yapılan çalışmalarda rastgele silme yönteminin doğruluk oranını arttırdığı, hata oranını düşürdüğü görülmüştür [64].

Şekil 17'de rastgele silme yöntemi ile belirli bölümlerinden silme işlemi yapılmış görüntü örnekleri görülmektedir.

4.10 Özellik uzayı dönüşümleri (Feature space transformations)

Bu görüntü artırma yönteminde görüntüler $n \times 1$ boyutlarındaki vektörlere dönüştürülür.



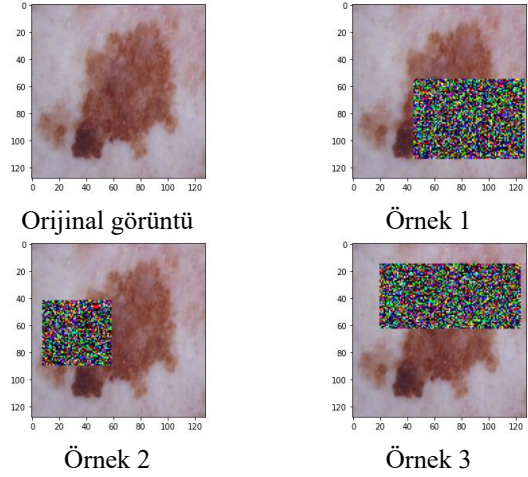
Şekil 18. Görüntünün tek boyutlu diziyeye dönüşümü

Şekil 18'de verilen dönüştürme işleminde görüntülerin vektörlere dönüştürülmesiyle bu görüntüler üzerinde pek çok

vektörel operasyon gerçekleştirilebilir. Gerçekleştirilen vektörel operasyonlardan bir tanesi de vektör üzerine Denklem (7)'ye göre gürültü eklemektir [65].

$$C'_i = C_i + \lambda X C'_i \quad (7)$$

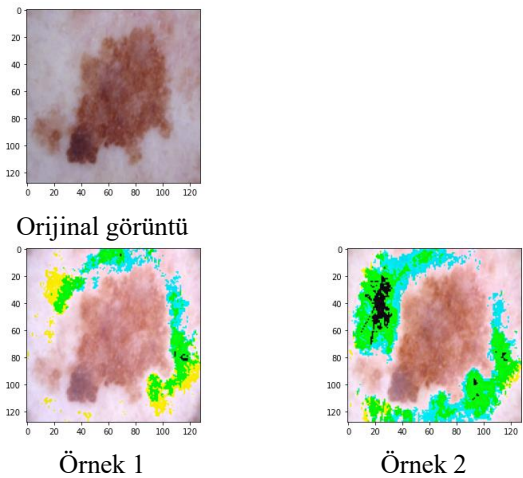
Denklem (7)'de C_i orijinal görüntü vektörünü, C'_i sentetik görüntü vektörünü, X gürültü metodunu ve λ gürültü oranını belirtmektedir. Şekil 19'da özellik uzayı dönüşümü ile elde edilmiş görüntüler görülmektedir.



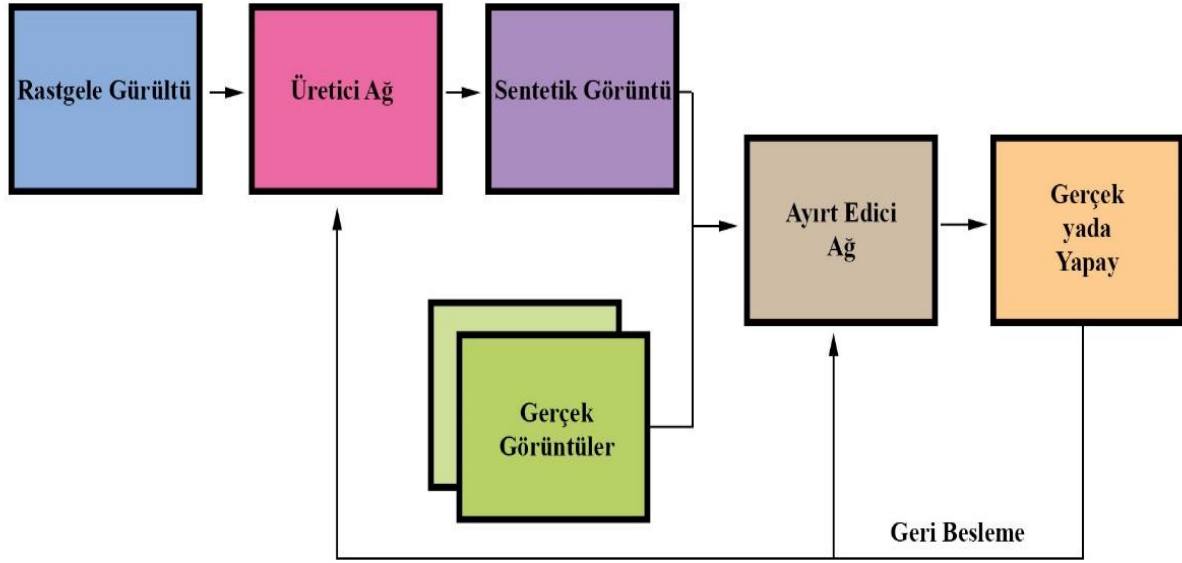
Şekil 17. Rastgele silme yöntemi ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

4.11 Çekişmeli üretici ağlar (Generative Adversarial Network-GAN)

Birbirleri ile çekişme halinde olan iki sinir ağından oluşan bu yapıda, ağlardan bir tanesi sentetik görüntüler oluştururken diğer ağ ise bu görüntülerin gerçek olup olmadığını ayırt etmeye çalışır. Üretici (Generative) ağ gerçeğe daha yakın görüntüler oluşturmayı öğrenirken, ayırt edici ağ ise gerçek görüntüler ile sentetik görüntüleri daha iyi ayırt etmeyi öğrenir. GAN yapısı Şekil 20'de görülmektedir.

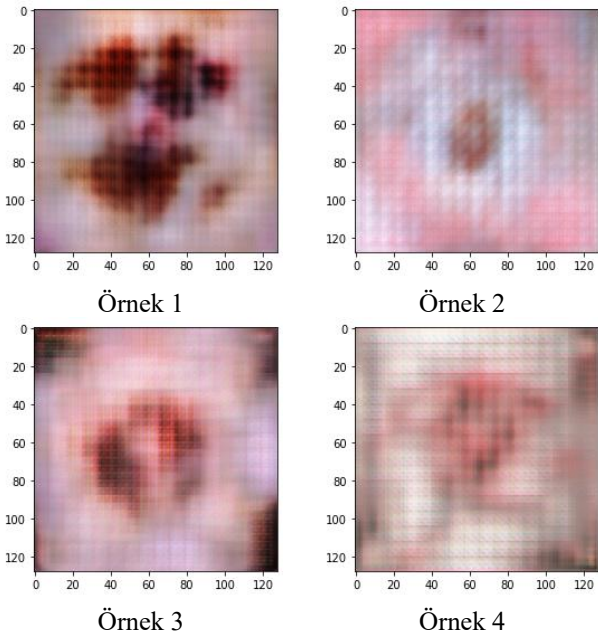


Şekil 19. Özellik uzayı dönüşümleri ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri



Şekil 20. Çekişmeli üretici ağ [69]

GAN ile üretilen görüntülerin orijinal görüntüden farklı ancak benzer olması sebebiyle dengesiz görüntü veri setlerini dengeli hale getirebilmek için gerekli sentetik görüntüleri elde etmede kullanılabilir [66]. Bu mimarideki üretici ağın ürettiği görüntüleri kullanarak yapılan görüntü artırma yöntemleri başarılı sonuçlar vermektedir [67], [68]. Ancak bazı durumlarda ayırt edici ağın aşırı öğrenmesi sebebiyle birbirine çok benzer görüntüler üretmesi sonucu olarak aşırı öğrenmeye sebep olabilmektedir [66]. Şekil 21’de GAN yöntemi ile elde edilmiş sentetik görüntülerdir.



Şekil 21. Çekişmeli üretici ağlar ile elde edilen sentetik görüntü örnekleri

5 Deneysel çalışmalar

Görüntü artırma yöntemleri kullanılarak veri setlerinin dengeli hale getirilmesi, yaygın şekilde üzerinde çalışılan konu başlıklarından biridir [70]. Görüntü artırma yöntemleri, temel görüntü işleme yöntemleri (Flipping, Mixing, Cropping vs.) ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar (GAN) olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir [7]. Bu yöntemlerin test edilebilmesi için yaygın şekilde kullanılan dengesiz veri setleri bulunmaktadır [71], [72]. Bu çalışmada Ham10000 veri seti, bu çalışmada daha önce bahsedilen görüntü artırma teknikleri kullanılarak dengeli hale getirilmiştir. Dengeli hale getirilen veri seti önceden eğitilmiş evrimsel sinir ağları ile test edilmiştir. Önceden eğitilmiş evrimsel sinir ağlarında, ImageNet veri seti ile ağ önceden eğitilerek sınıflandırma başarımının artırılması amaçlanmaktadır. Literatürde bu ağ yapıları yaygın şekilde kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir [43], [73]–[75].

5.1 Veri seti

Literatürde yaygın şekilde görüntü artırma yöntemleri uygulanan dengesiz veri setlerinden bir tanesi de Ham10000 veri setidir [76]. Bu veri setinde, 7 farklı sınıfa bölünmüş halde 10,015 adet renkli deri lezyonu görüntüsü bulunmaktadır.

Ham10000 veri seti, 7 farklı sınıftan oluşmakta olup sınıfların örnek sayılarına bakıldığında dengesiz bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Yapılan çalışmada, veri setindeki tüm sınıfların örnek sayıları, 6705 adet ile en fazla sayıda örneğe sahip olan NV sınıfına eşitlenmiştir. Çalışmada kullanılan veri setinin sınıfları ve sınıflar üzerinde yapılacak olan görüntü artırım oranları Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de yer alan görüntü artırım oranları (AO) Denklem (8)’e göre, görüntü artırım adetleri (AA) ise Denklem (9)’a göre hesaplanmıştır [77]. Denklem (8) ve (9)’da ÇS; çoğunluk

sınıfı örnek sayısını, AS; azınlık sınıfı örnek sayısını ifade etmektedir.

Tablo 2. Ham10000 veri seti sınıf dağılımı

Sınıf adı	Hastalık adı	Adet	Artırım oranı (%)	Artırım adeti	Görüntü artırımı sonrası adet
MEL	Melanoma	1113	502.42	5592	6705
NV	Nevus	6705	0	0	6705
BCC	Basal cell carcinoma	514	1204.47	6191	6705
AKIEC	Actinic keratosis	327	1950.45	6378	6705
BKL	Bening keratosis	1099	510.1	5606	6705
DF	Dermato fibroma	115	5730.43	6590	6705
VASC	Vascular lesion	142	4621.83	6563	6705
	Toplam	10015		36920	46935

$$AO = \left(\left(\frac{CS}{AS} \right) - 1 \right) \times 100 \quad (8)$$

$$AA = \frac{AO \times (AS)}{100} \quad (9)$$

5.2 Performans değerlendirilmesi

Bu çalışmada, görüntü artırma tekniklerinin sınıflandırma başarımına etkisini değerlendirebilmek için dengesiz bir veri seti üzerinde önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağı yöntemleri kullanılmıştır. Evrişimsel sinir ağları, görüntü veri setleri üzerinde başarılı sonuçlar verse de dengesiz görüntü veri setleri üzerinde başarımı düşmektedir [25], [56]. Evrişimsel sinir ağlarının veri setleri üzerindeki başarımını arttırmak için önceden eğitilmiş ağların kullanılması sonuçları olumlu sonuçlar vermektedir [73], [75], [78]. Ancak veri seti dengeli hale getirildiğinde önceden eğitilmiş ağların veri setinin dengesiz haline göre

daha başarılı sonuçlar verdiği yapılan testlerde görülmüştür. Bu çalışmada ResNet50, DenseNet201 ve MobileNet önceden eğitilmiş ağları kullanılmıştır [79]. Dengeli ve dengesiz veri setleri üzerinde yapılan testler Windows 10 işletim sistemi, Intel Core i7@2.9 GHz işlemci ve 32 GB hafızaya sahip bir bilgisayar üzerinde yapılmıştır. Elde edilen en yüksek ve en düşük sınıflandırma sonuçları koyu renk ile vurgulanmıştır.

5.3 Değerlendirme metrikleri

Evrişimsel sinir ağlarının sınıflandırma sonuçlarının değerlendirilmesi için doğruluk (D), duyarlılık (DY), hassasiyet (HS), yanlış pozitif oranı (YPO), yanlış negatif oranı (YNO) ve F1 skoru (F1) metrikleri kullanılmıştır. Denklem (10)'de verilen D değeri, doğru tahminlerin tüm tahminlere olan oranıdır. Denklem (11)'de verilen HS değeri, doğru pozitif tahminlerin tüm pozitif tahminlere oranıdır. Denklem (12)'de verilen DY değeri, doğru pozitif tahminlerin tüm pozitiflere olan oranıdır. Denklem (13)'de verilen F1 değeri, HS ve DY değerlerinin harmonik ortalamasıdır. Denklem (14)'de verilen YPO değeri, yanlış pozitif tahminlerin tüm negatiflere olan oranıdır. Denklem (15)'te verilen YNO değeri, yanlış negatif tahminlerin tüm pozitiflere olan oranıdır.

$$D = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (10)$$

$$HS = \frac{DP}{DP + YP} \quad (11)$$

$$DY = \frac{DP}{DP + YN} \quad (12)$$

$$F1 = 2x \frac{HS \times DY}{HS + DY} \quad (13)$$

$$YPO = \frac{YP}{YP + DN} \quad (14)$$

$$YNO = \frac{YN}{YN + DP} \quad (15)$$

5.4 Sınıflandırma sonuçları ve tartışma

Bu çalışmada, öncelikle Ham10000 veri setinde bulunan görüntü örneklerinin çözünürlük değerleri 600x450'den 64x64 çözünürlük değerlerine indirgenmiştir. Veri seti çözünürlüğünün daha düşük bir değere indirgenmesi işlemi özellikle derin öğrenme algoritmalarında gerekli kaynak ihtiyacını düşürdüğünden dolayı yaygın şekilde tercih edilen bir işlemdir [80]. 64x64 çözünürlük değerine indirilen görüntülerden oluşan Ham10000 veri seti bu çalışmada daha önce bahsedilen görüntü artırma teknikleri ile dengeli hale getirilmiştir. Daha sonra veri setinin dengeli hali ve orijinal hali ResNet50, DenseNet201 ve MobileNet önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağları ile test edilmiştir. Önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağlarına ait parametreler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Resnet50, DenseNet201 ve MobileNet parametreleri

Parametreler	Önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağı yapısı		
	ResNet50	DenseNet201	MobileNet
Giriş	(64x64x3)	(64x64x3)	(64x64x3)
Ağırlıklar	ImageNet ile eğitildi	ImageNet ile eğitildi	ImageNet ile eğitildi
Optimize edici	Adam	Adam	Adam
Kayıp fonksiyonu	Seyrek kategorik çapraz entropi	Seyrek kategorik çapraz entropi	Seyrek kategorik çapraz entropi
Gizli katman aktivasyon fonksiyonu	ReLU	ReLU	ReLU
Çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonu	Softmax	Softmax	Softmax
Öğrenme oranı	0.001	0.001	0.001
Devir sayısı	30	30	30

Önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağlarına ait parametrelerin seçiminde optimize edici, kayıp fonksiyonu ve aktivasyon fonksiyonları için ızgara arama yöntemi tercih edilmiştir. Öğrenme oranı ve devir sayısı için ise rastgele arama yöntemi tercih edilmiştir.

Tablo 4. Ham10000 veri setinin dengelenmeden önceki sınıflandırma raporları

Model	D	F1	YPO	YNO
ResNet50	0.716	0.306	0.095	0.718
DenseNet201	0.746	0.542	0.075	0.444
MobileNet	0.784	0.600	0.058	0.439

Tablo 4'te veri setinin dengelenmemiş hali ResNet50, DenseNet201 ve MobileNet önceden eğitilmiş ağları ile test edilerek elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 0.784 doğruluk oranı ile MobileNet ağ yapısı orijinal veri seti üzerinde en yüksek başarı oranına ulaşmıştır.

Veri seti, bu çalışmada incelenen görüntü artırma teknikleri ile ayrı ayrı dengelendikten sonra ResNet50, DenseNet201 ve MobileNet önceden eğitilmiş ağları ile ayrı ayrı test edilmiştir. Elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7'da görülmektedir.

Tablo 5. Görüntü artırma tekniklerinin ResNet50 ile sınıflandırma sonuçları

Teknik	D	F1	YPO	YNO
Yer değiştirme	0.916	0.915	0.013	0.082
Döndürme	0.845	0.846	0.025	0.152
Rastgele silme	0.937	0.938	0.010	0.062
Gürültü ekleme	0.967	0.967	0.005	0.032
Resimlerin karıştırılması	0.945	0.946	0.009	0.053
Çekirdek filtreleri	0.941	0.945	0.009	0.058
Çekişmeli üretici ağ	0.915	0.916	0.014	0.084
Çevirme	0.776	0.776	0.037	0.222
Özellik uzayı dönüşümü	0.927	0.928	0.012	0.071
Kırpma	0.860	0.858	0.023	0.138
Renk uzayı dönüşümü	0.964	0.964	0.005	0.035

Sınıflandırma sonuçları incelendiğinde görüntü artırma tekniklerinin evrişimsel sinir ağları ile sınıflandırma performansını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Veri setinin dengelenmemiş hali bu çalışmada kullanılan önceden eğitilmiş ağlar ile sınıflandırma testlerine tabi tutulduğunda doğruluk oranları %71-78 aralığında yer almaktadır. Veri seti farklı yöntemler ile dengelenerek önceden eğitilmiş ağlar ile sınıflandırma testlerine tabi tutulduğunda ise doğruluk oranları %77-96 aralığında yer almaktadır. ResNet50 ağ yapısı ile yapılan testlere göre 0.967 ile gürültü ekleme yöntemi en yüksek başarı oranına, 0.776 ile çevirme yöntemi en düşük başarı oranına ulaşmıştır.

Tablo 6'da görüldüğü üzere DenseNet201 ile yapılan testlerde 0.965 doğruluk oranı ile renk uzayı dönüşümü yöntemi en yüksek, 0.736 doğruluk oranı ile çevirme yöntemi en düşük başarı oranına ulaşmıştır.

Tablo 6. Görüntü artırma tekniklerinin DenseNet201 ile sınıflandırma sonuçları

Teknik	D	F1	YPO	YNO
Yer değiştirme	0.906	0.906	0.015	0.092
Döndürme	0.806	0.808	0.032	0.190
Rastgele silme	0.933	0.933	0.011	0.066
Gürültü ekleme	0.943	0.944	0.009	0.056
Resimlerin karıştırılması	0.963	0.963	0.006	0.036
Çekirdek filtreleri	0.945	0.945	0.009	0.054
Çekişmeli üretici ağ	0.947	0.947	0.008	0.052
Çevirme	0.736	0.758	0.043	0.260
Özellik uzayı dönüşümü	0.897	0.898	0.017	0.101
Kırpma	0.897	0.897	0.017	0.102
Renk uzayı dönüşümü	0.965	0.965	0.005	0.034

Tablo 7’de görüldüğü üzere MobileNet ile yapılan testlerde ise 0.974 doğruluk oranı ile resimlerin karıştırılması yöntemi en yüksek doğruluk oranına, 0.879 doğruluk oranı ile yer değiştirme yöntemi en düşük başarı oranına ulaşmıştır.

Tablo 7. Görüntü artırma tekniklerinin MobileNet ile sınıflandırma sonuçları

Teknik	D	F1	YPO	YNO
Yer değiştirme	0.879	0.876	0.020	0.118
Döndürme	0.910	0.910	0.014	0.089
Rastgele silme	0.931	0.931	0.011	0.069
Gürültü ekleme	0.972	0.972	0.004	0.027
Resimlerin karıştırılması	0.974	0.974	0.004	0.025
Çekirdek filtreleri	0.949	0.950	0.008	0.049
Çekişmeli üretici ağ	0.946	0.946	0.008	0.053
Çevirme	0.947	0.947	0.008	0.052
Özellik uzayı dönüşümü	0.904	0.903	0.015	0.094
Kırpma	0.896	0.895	0.017	0.103
Renk uzayı dönüşümü	0.969	0.969	0.005	0.030

Tablo 5, 6 ve 7 incelendiğinde farklı görüntü artırma tekniklerinin farklı performanslar sergilediği görülmektedir.

Özellikle Döndürme ve Çevirme tekniklerinde, görüntü üzerinde herhangi bir değişim gerçekleştirilmemesi ve işlem sonucunda elde edilen görüntünün orijinal görüntüye çok benzemesi ihtimalinin yüksek olması bu tekniklerin daha başarısız bir performans sergilemelerine neden olmuştur.

Literatürde, görüntü artırma teknikleri bu çalışmada olduğu gibi her biri yalın halde ya da her biri geliştirilerek kullanılmaktadır [8], [34], [64]. Bunun yanında görüntü artırma tekniklerinden 2 ya da daha fazlası bir araya getirilerek karşılaştırılan yöntemlere göre daha başarılı ya da daha başarısız sonuçlar elde edilebilmektedir, bu durum Tablo 8’de görülmektedir.

Tablo 8 incelendiğinde görüntü artırma tekniklerinin birlikte kullanımında her durumda çok başarılı sonuçlar vermemektedir. Rasheed ve ark. yapmış oldukları çalışmalarında beş farklı tekniği kullanarak ResNetXt101 ağ yapısı ile 0.871 doğruluk oranına ulaşırken, bu çalışmada DenseNet201 ağ yapısı ile veri setine sadece renk uzayı dönüşümü uygulayarak 0.965 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bunun yanında, bu çalışmada döndürme ve çevirme teknikleri tek başlarına kullanıldığında en yüksek MobileNet ağ yapısı ile 0.947 doğruluk oranına ulaşılabilirken, Çakmak ve Tenekeci yapmış oldukları çalışmalarında döndürme ve çevirme tekniklerini birlikte kullanarak Nasnet Mobile ağ yapısı ile 0.979 doğruluk oranına ulaşmışlardır.

Tablo 8. 2 ya da daha fazla görüntü artırımı tekniği kullanan çalışmalar

Çalışma	Veri seti	ESA yapısı	Görüntü artırma teknikleri	D
Xin ve ark. [81]	Ham1000	VIT	Çevirme, kırpma, döndürme, renk uzayı dönüşümü	0.941
Benedetti ve ark. [82]	Ham1000	ResNet-v2	Çevirme, yer değiştirme, döndürme, kırpma	0.789
Rasheed ve ark. [83]	Ham1000	ResNet Xt101	GAN, çevirme, döndürme, yer değiştirme, renk uzayı dönüşümü	0.871
Çakmak ve Tenekeci [84]	Ham1000	Nasnet Mobile	Döndürme, çevirme	0.979

6 Sonuç

Dengesiz veri kümelerinin, sınıflandırma algoritmalarını olumsuz etkilediği hem bu çalışmada hem de yapılan diğer çalışmalarda görülmüştür. Bu sorunun çözümü için geliştirilen yöntemlerden bir tanesi de veri kümesini görüntü artırma teknikleri kullanarak dengeli hale getirmektir. Genel olarak görüntü artırma işlemi aşırı örnekleme yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Ancak aşırı örnekleme

yöntemlerinde benzer örnekler üretmek aşırı öğrenme problemlerine yol açabilir. Bu çalışmada, dengesiz veri seti probleminin çözümü için literatürde yaygın 11 farklı görüntü artırma tekniği Ham10000 veri setine uygulanarak karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca 11 farklı görüntü artırma tekniği ile dengelenmiş veri setleri ResNet50, DenseNet201 ve MobileNet önceden eğitilmiş ağlarını içeren evrimsel sinir ağları üzerinde ayrı ayrı test edilmiş ve karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Sonuç olarak, aşırı örnekleme yöntemleri Ham10000 veri kümesine uygulandığında performans değerlendirme kriterleri açısından değerlendirildiğinde gürültü ekleme yöntemi belirgin şekilde ResNet50 modelinin, renk uzayı dönüşümü yöntemi DenseNet201 modelinin ve gürültü ekleme yöntemi de MobileNet modelinin sınıflandırma başarısını artırmıştır. Bu çalışmada anlatılan aşırı örnekleme yöntemlerinin çalışma mantıkları analiz edilerek dengesiz veri kümeleri için yeni ya da melez daha etkili aşırı örnekleme yöntemleri önerilebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 3

Kaynaklar

- [1] M. Šprogar, M. Colnarić, and D. Verber, On data windows for fault detection with neural networks, IFAC-PapersOnLine, vol. 54, no. 4, pp. 38–43, Jan. 2021. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.007.
- [2] Z. Kayumov, D. Tumakov, and S. Mosin, Hierarchical convolutional neural network for handwritten digits recognition, Procedia Comput Sci, vol. 171, pp. 1927–1934, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.procs.2020.04.206.
- [3] F. Luongo, R. Hakim, J. H. Nguyen, A. Anandkumar, and A. J. Hung, Deep learning-based computer vision to recognize and classify suturing gestures in robot-assisted surgery, Surgery (United States), vol. 169, no. 5, pp. 1240–1244, May 2021. doi: 10.1016/j.surg.2020.08.016.
- [4] D. Li, T. Haritunians, E. Mengesha, S. R. Targan, and D. McGovern, Using deeplearning and genetic bigdata to predict crohn's disease, 2019. doi: 10.1016/s0016-5085(19)36864-7.
- [5] O. Russakovsky et al., Imagenet large scale visual recognition challenge, Int J Comput Vis, vol. 115, no. 3, pp. 211–252, Dec. 2015. doi: 10.1007/s11263-015-0816-y/figures/16.
- [6] S. Reshma Prakash and P. Nath Singh, Object detection through region proposal based techniques, Mater Today Proc, vol. 46, pp. 3997–4002, Jan. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.533.
- [7] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, A survey on image data augmentation for deep learning, J Big Data, vol. 6, no. 1, pp. 1–48, Dec. 2019. doi: 10.1186/s40537-019-0197-0/figures/33.
- [8] J. Lemley, S. Bazrafkan, and P. Corcoran, Smart augmentation - learning an optimal data augmentation strategy, IEEE Access, vol. 5, pp. 5858–5869, Mar. 2017. doi: 10.1109/access.2017.2696121.
- [9] M. Nagaraju, P. Chawla, S. Upadhyay, and R. Tiwari, Convolution network model based leaf disease detection using augmentation techniques, Expert Syst, vol. 39, no. 4, p. e12885, May 2022. doi: 10.1111/exsy.12885.
- [10] J. M. Haut, M. E. Paoletti, J. Plaza, A. Plaza, and J. Li, Hyperspectral image classification using random occlusion data augmentation, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 16, no. 11, pp. 1751–1755, Nov. 2019. doi: 10.1109/lgrs.2019.2909495.
- [11] Z. Li, K. Kamnitsas, and B. Glocker, Analyzing overfitting under class imbalance in neural networks for image segmentation, IEEE Trans Med Imaging, vol. 40, no. 3, pp. 1065–1077, Mar. 2021. doi: 10.1109/tmi.2020.3046692.
- [12] P. Thanapol, K. Lavangnananda, P. Bouvry, F. Pinel, and F. Leprevost, Reducing overfitting and improving generalization in training convolutional neural network (CNN) under limited sample sizes in image recognition, InCIT 2020 - 5th International Conference on Information Technology, pp. 300–305, Oct. 2020. doi: 10.1109/incit50588.2020.9310787.
- [13] W. Lee and K. Seo, Downsampling for binary classification with a highly imbalanced dataset using active learning, Big Data Research, vol. 28, p. 100314, May 2022. doi: 10.1016/j.bdr.2022.100314.
- [14] M. Nagaraju, P. Chawla, and N. Kumar, Performance improvement of deep learning models using image augmentation techniques, Multimed Tools Appl, vol. 81, no. 7, pp. 9177–9200, Mar. 2022. doi: 10.1007/s11042-021-11869-x/tables/10.
- [15] M. John and S. Santhanalakshmi, Image augmentation using GAN models in computer vision, proceedings - 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication, ICOSEC 2021, pp. 1194–1201, 2021. doi: 10.1109/icosec51865.2021.9591692.
- [16] D. Vitas, M. Tomic, and M. Burul, Image augmentation techniques for cascade model training, 2018 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference, ZINC 2018, pp. 78–83, Aug. 2018. doi: 10.1109/zinc.2018.8448407.
- [17] G. Chandrashekar, A. Raaza, V. Rajendran, and D. Ravikumar, Side scan sonar image augmentation for sediment classification using deep learning based transfer learning approach, Mater Today Proc, Jul. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.222.
- [18] M. L. Huang, T. C. Chuang, and Y. C. Liao, Application of transfer learning and image augmentation technology for tomato pest identification, Sustainable Computing: Informatics and Systems, vol. 33, p. 100646, Jan. 2022. doi: 10.1016/j.suscom.2021.100646.
- [19] S. I. Hossain et al., Exploring convolutional neural networks with transfer learning for diagnosing Lyme disease from skin lesion images, Comput Methods Programs Biomed, vol. 215, p. 106624, Mar. 2022. doi: 10.1016/j.cmpb.2022.106624.
- [20] P. Bansal, R. Garg, and P. Soni, Detection of melanoma in dermoscopic images by integrating

- features extracted using handcrafted and deep learning models, *Comput Ind Eng*, vol. 168, p. 108060, Jun. 2022. doi: [10.1016/j.cie.2022.108060](https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108060).
- [21] M. A. Khan, Y. D. Zhang, M. Sharif, and T. Akram, Pixels to Classes: Intelligent learning framework for multiclass skin lesion localization and classification, *Computers & Electrical Engineering*, vol. 90, p. 106956, Mar. 2021. doi: [10.1016/j.compeleceng.2020.106956](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106956).
- [22] K. Ali, Z. A. Shaikh, A. A. Khan, and A. A. Laghari, Multiclass skin cancer classification using EfficientNets – a first step towards preventing skin cancer, *Neuroscience Informatics*, vol. 2, no. 4, p. 100034, Dec. 2022. doi: [10.1016/j.neuri.2021.100034](https://doi.org/10.1016/j.neuri.2021.100034).
- [23] C. Barata, M. E. Celebi, and J. S. Marques, A survey of feature extraction in dermoscopy image analysis of skin cancer, *IEEE J Biomed Health Inform*, vol. 23, no. 3, pp. 1096–1109, May 2019. doi: [10.1109/jbhi.2018.2845939](https://doi.org/10.1109/jbhi.2018.2845939).
- [24] K. M. Hosny, M. A. Kassem, and M. M. Foaud, Classification of skin lesions using transfer learning and augmentation with Alex-net, *PLoS One*, vol. 14, no. 5, p. e0217293, May 2019. doi: [10.1371/journal.pone.0217293](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217293).
- [25] H. Kim, W. K. Jung, Y. C. Park, J. W. Lee, and S. H. Ahn, Broken stitch detection method for sewing operation using CNN feature map and image-processing techniques, *Expert Syst Appl*, vol. 188, p. 116014, Feb. 2022. doi: [10.1016/j.eswa.2021.116014](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116014).
- [26] P. Baro and M. D. Borah, A factor based multiple imputation approach to handle class imbalance, *Procedia Comput Sci*, vol. 218, pp. 103–112, Jan. 2023. doi: [10.1016/j.procs.2022.12.406](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.406).
- [27] Q. Dai, J. wei Liu, and Y. hui Shi, Class-overlap undersampling based on Schur decomposition for Class-imbalance problems, *Expert Syst Appl*, vol. 221, p. 119735, Jul. 2023. doi: [10.1016/j.eswa.2023.119735](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119735).
- [28] X. Yuan, S. Chen, H. Zhou, C. Sun, and L. Yuwen, CHSMOTE: Convex hull-based synthetic minority oversampling technique for alleviating the class imbalance problem, *Inf Sci (N Y)*, vol. 623, pp. 324–341, Apr. 2023. doi: [10.1016/j.ms.2022.12.056](https://doi.org/10.1016/j.ms.2022.12.056).
- [29] Z. Jiang, L. Zhao, Y. Lu, Y. Zhan, and Q. Mao, A semi-supervised resampling method for class-imbalanced learning, *Expert Syst Appl*, vol. 221, p. 119733, Jul. 2023. doi: [10.1016/j.eswa.2023.119733](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119733).
- [30] F. Sultana, A. Sufian, and P. Dutta, Evolution of image segmentation using deep convolutional neural network: a survey, *Knowl Based Syst*, vol. 201–202, p. 106062, Aug. 2020. doi: [10.1016/j.knosys.2020.106062](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106062).
- [31] M. Temraz and M. T. Keane, Solving the class imbalance problem using a counterfactual method for data augmentation, *Machine Learning with Applications*, vol. 9, p. 100375, Sep. 2022. doi: [10.1016/j.mlwa.2022.100375](https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100375).
- [32] J. Engelmann and S. Lessmann, Conditional wasserstein gan-based oversampling of tabular data for imbalanced learning, *Expert Syst Appl*, vol. 174, p. 114582, Jul. 2021. doi: [10.1016/j.eswa.2021.114582](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114582).
- [33] S. Xue et al., 2D probabilistic undersampling pattern optimization for MR image reconstruction, *Med Image Anal*, vol. 77, p. 102346, Apr. 2022. doi: [10.1016/j.media.2021.102346](https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102346).
- [34] L. Nanni, M. Paci, S. Brahnem, and A. Lumini, Comparison of different image data augmentation approaches, *Journal of Imaging* 2021, Vol. 7, Page 254, vol. 7, no. 12, p. 254, Nov. 2021. doi: [10.3390/jimaging7120254](https://doi.org/10.3390/jimaging7120254).
- [35] L. Perez and J. Wang, The Effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning, Dec. 2017, Accessed: May 25, 2023. [Online]. available: <https://arxiv.org/abs/1712.04621v1>
- [36] M. V. Valueva, N. N. Nagornov, P. A. Lyakhov, G. V. Valuev, and N. I. Chervyakov, Application of the residue number system to reduce hardware costs of the convolutional neural network implementation, *Math Comput Simul*, vol. 177, pp. 232–243, Nov. 2020. doi: [10.1016/j.matcom.2020.04.031](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.04.031).
- [37] J. X. Mi, J. Feng, and K. Y. Huang, Designing efficient convolutional neural network structure: A survey, *Neurocomputing*, vol. 489, pp. 139–156, Jun. 2022. doi: [10.1016/j.neucom.2021.08.158](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.08.158).
- [38] S. Kalra and A. Leekha, Survey of convolutional neural networks for image captioning, *Journal of Information and Optimization Sciences*, vol. 41, no. 1, pp. 239–260, Jan. 2020. doi: [10.1080/02522667.2020.1715602](https://doi.org/10.1080/02522667.2020.1715602).
- [39] S. Ding, H. Zhu, W. Jia, and C. Su, A survey on feature extraction for pattern recognition, *Artif Intell Rev*, vol. 37, no. 3, pp. 169–180, Mar. 2012. doi: [10.1007/s10462-011-9225-y](https://doi.org/10.1007/s10462-011-9225-y).
- [40] T. Kavzoglu and P. M. Mather, The role of feature selection in artificial neural network applications, *Int J Remote Sens*, vol. 23, no. 15, pp. 2919–2937, 2002. doi: [10.1080/01431160110107743](https://doi.org/10.1080/01431160110107743).
- [41] A. Ferreira and G. Giralaldi, Convolutional neural network approaches to granite tiles classification, *Expert Syst Appl*, vol. 84, pp. 1–11, Oct. 2017. doi: [10.1016/j.eswa.2017.04.053](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.053).
- [42] P. Witonchart and P. Chongstitvatana, Application of structured support vector machine backpropagation to a convolutional neural network for human pose estimation, *Neural Networks*, vol. 92, pp. 39–46, Aug. 2017. doi: [10.1016/j.neunet.2017.02.005](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2017.02.005).
- [43] A. Deshpande, V. V. Estrela, and P. Patavardhan, The DCT-CNN-ResNet50 architecture to classify brain tumors with super-resolution, convolutional neural network, and the ResNet50, *Neuroscience Informatics*, vol. 1, no. 4, p. 100013, Dec. 2021. doi: [10.1016/j.neuri.2021.100013](https://doi.org/10.1016/j.neuri.2021.100013).
- [44] M. Ebrahim, M. Al-Ayyoub, and M. A. Alsmirat, Will transfer learning enhance imagenet classification accuracy using imagenet-pretrained models?, 2019 10th International Conference on Information and

- Communication Systems, ICICS 2019, pp. 211–216, Jun. 2019. doi: [10.1109/iacs.2019.8809114](https://doi.org/10.1109/iacs.2019.8809114).
- [45] S. ur Rehman et al., Unsupervised pre-trained filter learning approach for efficient convolution neural network, *Neurocomputing*, vol. 365, pp. 171–190, Nov. 2019. doi: [10.1016/j.neucom.2019.06.084](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.06.084).
- [46] L. Zaniolo and O. Marques, On the use of variable stride in convolutional neural networks, *Multimed Tools Appl*, vol. 79, no. 19–20, pp. 13581–13598, May 2020. doi: [10.1007/s11042-019-08385-4/metrics](https://doi.org/10.1007/s11042-019-08385-4/metrics).
- [47] A. D. Nguyen, S. Choi, W. Kim, S. Ahn, J. Kim, and S. Lee, Distribution padding in convolutional neural networks, *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP*, vol. 2019-September, pp. 4275–4279, Sep. 2019. doi: [10.1109/icip.2019.8803537](https://doi.org/10.1109/icip.2019.8803537).
- [48] . F. Agarap, Deep learning using rectified linear units (ReLU), Mar. 2018. doi: [10.48550/arxiv.1803.08375](https://doi.org/10.48550/arxiv.1803.08375).
- [49] Z. Song et al., A sparsity-based stochastic pooling mechanism for deep convolutional neural networks, *Neural Networks*, vol. 105, pp. 340–345, Sep. 2018. doi: [10.1016/j.neunet.2018.05.015](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.05.015).
- [50] A. Zafar et al., A comparison of pooling methods for convolutional neural networks, *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 8643, vol. 12, no. 17, p. 8643, Aug. 2022. doi: [10.3390/app12178643](https://doi.org/10.3390/app12178643).
- [51] W. S. Yang, Y. C. Feng, and T. Y. Liang, An image quality predictor based on convolution neural networks, *ISPACS 2021 - International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems: 5G Dream to Reality*, Proceeding, 2021. doi: [10.1109/ispacs51563.2021.9651075](https://doi.org/10.1109/ispacs51563.2021.9651075).
- [52] A. Bilal, G. Sun, and S. Mazhar, Finger-vein recognition using a novel enhancement method with convolutional neural network, *Journal of Chinese Institute of Engineers*, vol. 44, no. 5, pp. 407–417, 2021. doi: [10.1080/02533839.2021.1919561](https://doi.org/10.1080/02533839.2021.1919561).
- [53] N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, and R. Salakhutdinov, Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting, *Journal of Machine Learning Research*, vol. 15, pp. 1929–1958, 2014. doi: [10.5555/2627435](https://doi.org/10.5555/2627435).
- [54] C. Liu, Y. Liang, and W. Wen, Fire image augmentation based on diverse alpha compositing for fire detection, *Proceedings - 2022 15th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, CISP-BMEI 2022*, 2022. doi: [10.1109/cisp-bmei56279.2022.9979846](https://doi.org/10.1109/cisp-bmei56279.2022.9979846).
- [55] J. Wang and S. Lee, Data augmentation methods applying grayscale images for convolutional neural networks in machine vision, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 15, Aug. 2021. doi: [10.3390/app11156721](https://doi.org/10.3390/app11156721).
- [56] R. Takahashi, T. Matsubara, and K. Uehara, Data augmentation using random image cropping and patching for deep CNNs, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 30, no. 9, pp. 2917–2931, Sep. 2020. doi: [10.1109/tcsvt.2019.2935128](https://doi.org/10.1109/tcsvt.2019.2935128).
- [57] N. Tajbakhsh, M. B. Gotway, and J. Liang, Computer-aided pulmonary embolism detection using a novel vessel-aligned multi-planar image representation and convolutional neural networks, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9350, pp. 62–69, 2015. doi: [10.1007/978-3-319-24571-3_8/cover](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24571-3_8/cover).
- [58] A. Gupta, S. Venkatesh, S. Chopra, and C. Ledig, Generative image translation for data augmentation of bone lesion pathology, *Proceedings of Machine Learning Research*, vol. 102. PMLR, pp. 225–235, May 24, 2019. Accessed: Dec. 31, 2022. [Online]. available: <https://proceedings.mlr.press/v102/gupta19b.html>
- [59] F. J. Moreno-Barea, F. Strazzer, J. M. Jerez, D. Urda, and L. Franco, Forward noise adjustment scheme for data augmentation, *Proceedings of the 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2018*, pp. 728–734, Jan. 2019. doi: [10.1109/ssci.2018.8628917](https://doi.org/10.1109/ssci.2018.8628917).
- [60] G. Kang, X. Dong, L. Zheng, and Y. Yang, PatchShuffle regularization, Jul. 2017, Accessed: Dec. 31, 2022. [Online]. available: https://www.researchgate.net/publication/318670749_patchshuffle_regularization
- [61] N. Nausheen, A. Seal, P. Khanna, and S. Halder, A FPGA based implementation of Sobel edge detection, *Microprocess Microsyst*, vol. 56, pp. 84–91, Feb. 2018. doi: [10.1016/j.micpro.2017.10.011](https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.10.011).
- [62] T. Ma et al., Optimized Laplacian image sharpening algorithm based on graphic processing unit, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 416, pp. 400–410, Dec. 2014. doi: [10.1016/j.physa.2014.09.026](https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.09.026).
- [63] H. Inoue, Data Augmentation by Pairing Samples for Images Classification, *ICLR 2018 Conference*, ArXiv, 2018. doi: [10.48550/arxiv.1801.02929](https://doi.org/10.48550/arxiv.1801.02929)
- [64] . Saran, F. Nar, and A. N. Saran, Perlin random erasing for data augmentation, *SIU 2021 - 29th IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications*, Proceedings, Jun. 2021. doi: [10.1109/siu53274.2021.9477804](https://doi.org/10.1109/siu53274.2021.9477804).
- [65] S. Ozair and Y. Bengio, Deep Directed Generative Autoencoders, Oct. 2014, Accessed: Dec. 31, 2022. [Online]. available: https://www.researchgate.net/publication/313857747_dataset_augmentation_in_feature_space
- [66] C. Dewi, R. C. Chen, Y. T. Liu, and H. Yu, Various generative adversarial networks model for synthetic prohibitory sign image generation, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, Apr. 2021. doi: [10.3390/app11072913](https://doi.org/10.3390/app11072913).
- [67] L. van der Maaten and G. Hinton, Visualizing data using t-SNE, *Journal of Machine Learning Research*, vol. 9, no. 86, pp. 2579–2605, 2008, Accessed: Dec.

- 31, 2022. [Online]. available: <http://jmlr.org/papers/v9/vandermaaten08a.html>
- [68] V. Sandfort, K. Yan, P. J. Pickhardt, and R. M. Summers, Data augmentation using generative adversarial networks (CycleGAN) to improve generalizability in CT segmentation tasks, *Scientific Reports* 2019 9:1, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, Nov. 2019. doi: [10.1038/s41598-019-52737-x](https://doi.org/10.1038/s41598-019-52737-x).
- [69] Z. Qin, Z. Liu, P. Zhu, and Y. Xue, A GAN-based image synthesis method for skin lesion classification, *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 195, p. 105568, Oct. 2020. doi: [10.1016/j.cmpb.2020.105568](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105568).
- [70] N. E. Khalifa, M. Loey, and S. Mirjalili, A comprehensive survey of recent trends in deep learning for digital images augmentation, *Artif Intell Rev*, vol. 55, no. 3, pp. 2351–2377, Mar. 2022. doi: [10.1007/s10462-021-10066-4/tables/5](https://doi.org/10.1007/s10462-021-10066-4/tables/5).
- [71] V. Srivastava, D. Kumar, and S. Roy, A median based quadrilateral local quantized ternary pattern technique for the classification of dermatoscopic images of skin cancer, *Computers and Electrical Engineering*, vol. 102, p. 108259, Sep. 2022. doi: [10.1016/j.compeleceng.2022.108259](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108259).
- [72] K. S. Sudeep and K. K. Pal, Preprocessing for image classification by convolutional neural networks, 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, RTEICT 2016 - Proceedings, pp. 1778–1781, Jan. 2017. doi: [10.1109/rteict.2016.7808140](https://doi.org/10.1109/rteict.2016.7808140).
- [73] M. H. Rahman, M. K. A. Jannat, M. S. Islam, G. Grossi, S. Bursic, and M. Aktaruzzaman, Real-time face mask position recognition system based on MobileNet model, *Smart Health*, p. 100382, Jan. 2023. doi: [10.1016/j.smhl.2023.100382](https://doi.org/10.1016/j.smhl.2023.100382).
- [74] M. S. H. Talukder and A. K. Sarkar, Nutrients deficiency diagnosis of rice crop by weighted average ensemble learning, *Smart Agricultural Technology*, vol. 4, p. 100155, Aug. 2023. doi: [10.1016/j.atech.2022.100155](https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100155).
- [75] G. S. Nijaguna, J. A. Babu, B. D. Parameshachari, R. P. de Prado, and J. Frnda, Quantum Fruit Fly algorithm and ResNet50-VGG16 for medical diagnosis, *Appl Soft Comput*, vol. 136, p. 110055, Mar. 2023. doi: [10.1016/j.asoc.2023.110055](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110055).
- [76] P. Tschandl, The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions. Harvard Dataverse, 2018. doi: [10.7910/dvn/dbw86t](https://doi.org/10.7910/dvn/dbw86t).
- [77] M. H. Ibrahim, ODBOT: Outlier detection-based oversampling technique for imbalanced datasets learning, *Neural Comput Appl*, vol. 33, no. 22, pp. 15781–15806, Nov. 2021. doi: [10.1007/s00521-021-06198-x/tables/17](https://doi.org/10.1007/s00521-021-06198-x/tables/17).
- [78] P. Carcagnì et al., Classification of skin lesions by combining multilevel learnings in a DenseNet architecture, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11751 LNCS, pp. 335–344, 2019. doi: [10.1007/978-3-030-30642-7_30/cover](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30642-7_30/cover).
- [79] A. Sharma and P. K. Mishra, Covid-MANet: Multi-task attention network for explainable diagnosis and severity assessment of COVID-19 from CXR images, *Pattern Recognit*, vol. 131, p. 108826, Nov. 2022. doi: [10.1016/j.patcog.2022.108826](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.108826).
- [80] T. Gangavarapu and N. Patil, A novel filter–wrapper hybrid greedy ensemble approach optimized using the genetic algorithm to reduce the dimensionality of high-dimensional biomedical datasets, *Appl Soft Comput*, vol. 81, p. 105538, Aug. 2019. doi: [10.1016/j.asoc.2019.105538](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105538).
- [81] C. Xin et al., An improved transformer network for skin cancer classification, *Comput Biol Med*, vol. 149, p. 105939, 2022. doi: [10.1016/j.combiomed.2022.105939](https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105939).
- [82] P. Benedetti, D. Perri, M. Simonetti, O. Gervasi, G. Reali, and M. Femminella, Skin cancer classification using inception network and transfer learning, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 12249 LNCS, pp. 536–545, Nov. 2021. doi: [10.1007/978-3-030-58799-4_39](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58799-4_39).
- [83] A. Rasheed, A. Iqbal Umar, S. Hamad Shirazi, Z. Khan, S. Nawaz, and M. Shahzad, Automatic eczema classification in clinical images based on hybrid deep neural network, *Comput Biol Med*, vol. 147, p. 105807, 2022. doi: [10.1016/j.combiomed.2022.105807](https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105807).
- [84] M. Cakmak and M. E. Tenekeci, Melanoma detection from dermoscopy images using Nasnet Mobile with transfer learning, *SIU 2021 - 29th IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications, Proceedings*, Jun. 2021. doi: [10.1109/siu53274.2021.9477985](https://doi.org/10.1109/siu53274.2021.9477985).





Tarihi harç örneklerinin çoklu analitik yöntemler kullanılarak incelenmesi: Tyana Roma Hamamı (Niğde-Kemerhisar) örneği

Examination of historical mortar samples using multiple analytical methods: Tyana Roman Bath (Niğde-Kemerhisar) example

Hacer Bilgilioğlu^{1*} 

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

Öz

Tarihi yapıları oluşturan yapı malzemeleri genellikle taş, harçlarla yapılan tuğlalar ve ahşaptan oluşmaktadır. Tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında ilksel harç bileşenlerinin oranı çok önemli olduğundan harç örneklerinin kimyasal ve dokusal olarak incelenmesi ve bileşenlerin oranlarının saptanması gerekmektedir. Bu sebeple koruma/onarım çalışmalarında jeolojik kökenli malzemenin özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Tyana Roma Hamamı'na ait yapıların korunması/onarımına yönelik harç özelliklerinin analitik yöntemlerle tespiti amaçlanmıştır. Bu kapsamda pH ve iletkenlik analizi, agregada tane boyutu dağılımı için granülo-metrik elek analizi, X-Işını Floresans (XRF) analizi, X-Ray Diffraction (XRD) spektroskopisi ve petrografik incelemeler yapılmıştır. Petrografik incelemelerde örnekler içerisinde bağlayıcı, mineraller ve litik bileşenler tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan XRD analiz sonuçlarında mineral ve bağlayıcı özelliklerinin petrografik özelliklerle uyumlu olduğu görülmektedir. Örneklerin ana agrega içeriğinin kil/silt malzeme olduğu, iletkenlik ve pH analiz sonuçlarına göre ise harç örneklerinin yüksek derecede toplam tuz içeriklerine sahip, bazik özellikte olduğu tespit edilmiştir. Jeokimyasal analiz sonuçlarında ise örneklerin kireç türünün zayıf hidrolik kireç ile hidrolik kireç özellikte olduğu belirlenmiştir. Elde edilen tüm analiz sonuçları ile Roma Hamamı koruma/onarım çalışmalarında kullanılabilecek veriler üretilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tyana, Bağlayıcı, Petrografi, X-Işını Floresans (XRF), X-Ray Diffraction (XRD)

1 Giriş

Tarihi yapılar geçmişten günümüze milletlerin uygarlık yolundaki kültürünü taşıyan kültür varlıkları olup, gelecek nesillere yol gösterip ışık tutmaktadır. Ülkeler açısından bu milli kültürlerin korunup gelecek nesillere aktarılması oldukça önemlidir. Ülkemiz birçok medeniyete ev sahipliği yapmış birçok tarihi yapı barındıran ender bir coğrafyadır. Ülkemiz ve tüm dünya için tüm tarihi yapılar ortak miras olarak değerlendirilmektedir. Bu milli kültürün devamlılığının sağlanabilmesi için tarihi yapıların yeni

Abstract

The building materials that generally constitute historical structures are stone, bricks made with mortar, and wood. Since the proportion of primary mortar components is crucial in restoration works of historical buildings, it is necessary to chemically and texturally analyze mortar samples to determine the proportions of its constituents. Therefore, understanding the properties of geological materials is highly important in conservation and repair works. This study aims to identify the characteristics of mortar used in the preservation and restoration of the structures belonging to Tyana Roman Baths through analytical methods. In this scope, pH and conductivity analysis, granulometric sieve analysis for aggregate particle size distribution, X-Ray Fluorescence (XRF) analysis, X-Ray Diffraction (XRD) spectroscopy, and petrographic examinations were conducted. Petrographic examinations identified binders, minerals, and lithic components within the samples. Furthermore, the XRD analysis results indicated that the mineral and binder properties are consistent with the petrographic characteristics. The particle size analysis revealed that the main aggregate content consisted of clay/silt material, while the conductivity and pH analysis results indicated that the mortar samples had a high degree of total salt content and exhibited alkaline properties. The geochemical analysis results determined that the lime type in the samples was weak hydraulic lime and hydraulic lime. All the obtained analysis results were utilized to generate data that can be used in the conservation and repair works of the Roman Baths.

Keywords: Tyana, Cement, Petrography, X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD)

nesillere en iyi şekilde aktarılması titizlik gerektiren bir konudur [1]. Bu konudaki en önemli adımlarından biri de tarihi yapılarda uygulanacak koruma ve onarım çalışmalarında uygun yapı malzeme seçimi ve doğru uygulamaların belirlenmesidir [2]. Tarihi yapılarda kullanılan yapı elemanlarının özellikleri ile günümüzde kullanılan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri oldukça farklı olup restorasyon sırasında uygun olmayan malzeme seçimi tarihi yapılar için tehdit oluşturmaktadır [3,4]. Tarihi yapılarda kullanılan

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: hcanbas@aksaray.edu.tr (H. Bilgilioğlu)
Geliş / Received: 31.03.2023 Kabul / Accepted: 13.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1274588

malzemeler özenle seçilmiş olmalı ve tüm atmosferik şartlara uzun süre dayanıklı olmasına özen gösterilmelidir. Ancak yapılar için kullanılmış kayaç ve bağlayıcı malzemeler bir süre sonra ayrışıp aşınarak yapı için tehlikeli durumlar oluşturmaktadır. Bu sebeple yapı için seçilecek malzeme, kullanılacak yere ve amaca uygun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikte olmaması durumunda yapının dayanımını düşürerek çeşitli mühendislik problemlerine sebep olabilmektedir [5-7]. Geçmiş dönemlerde tarihi yapıya uygun olmayan kaya, harç ve sıva ile yapılan restorasyon çalışmaları tarihi yapılara telafisi mümkün olmayan zararlar meydana getirmiştir [8-10]. Tarihi yapıların restorasyonu, kültürel mirasın korunmasında önemli olup, restorasyon süreçlerinde kullanılan kaya ve harç malzemelerinin doğru seçimi, yapıların orijinal haline uygun olarak geri dönüştürülmesini sağlar. Bu kapsamda, birçok tarihi yapıda restorasyonda kullanılan kaya ve harç malzeme seçiminde yapılan hatalara ait örnek çalışmalar incelenmiştir [11-15]. Bu çalışmalara örnek olarak antik bir yapı olan Kaleiçi Yivli Minare Camii'nin restorasyon sürecinde yanlış harç seçiminin neden olduğu sorunlar incelenmiştir. Kaleiçi Yivli Minare Camii'nin restorasyon sürecinde kullanılan harç malzemesi, orijinal harcın fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine uygun olmadığı belirlenmiştir. Bu yanlış harç seçimi tarihi yapıda nem ve buharlaşma, tuz kristalleşmesi gibi sorunlara sebep olmuştur [13]. Yine Osmanlı dönemine ait bir tarihi yapı olan Çelebi Camii'nin restorasyonunda kullanılan yanlış harç seçimi ile yapıdaki nem dengelemesi bozulmuş ve kullanılan harcın farklı malzeme özellikleri nedeniyle uyumsuzluk ve tutarsızlık yaratmıştır [14]. Bir diğer örnek çalışma olan Mardin Nusaybin'de bulunan Mor Yakup Kilisesi örneğinde de geçmişte binada yapılan harç-sıva esaslı uygulamaların hatalı restorasyon işlemleri olduğunu göstermektedir. Bu hatalı çimento kullanımı, binanın iç duvarlarındaki restorasyon işlemleri sırasında yapıya zarar vermiştir [16].

Çalışma alanı olarak belirlenen Tyana antik kenti, Kapadokya bölgesinde bulunmaktadır ve tarihi kalıntıları ile ünlüdür. Kent, Roma İmparatorluğu döneminde önemli bir ticaret merkezi olarak kabul edilmiş olup, Roma hamamı da bu dönemde inşa edilmiştir. Bu dönemlerde hamamlar, antik dönemde sosyal hayatın önemli bir parçası olmuş olup ve genellikle şehir merkezlerinde bulunuyordu. Tyana antik kenti de, bu dönemde önemli bir ticaret merkeziydi ve hamamı da bu nedenle oldukça büyük bir öneme sahiptir. Hamamın inşa edildiği dönemde kullanılan malzemeler ve yapım teknikleri, bu önemli yapıyı anlamak açısından oldukça önemlidir. Bu makalede, Tyana antik kentinde bulunan Roma hamamından alınan harç örneklerine arkeometrik analizler yapılmıştır. Bu analizler arasında mineralojik-petrografik analizler, kimyasal analizler, fiziksel analizler gibi yöntemler yer almaktadır. Bu analizlerin nasıl uygulandığı, hangi sonuçları elde etmeye yardımcı olduğu ve restorasyon süreçlerinde nasıl yardımcı olabileceği belirlenmiştir. Ayrıca yapılan analizler ile yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri ve yapım teknikleri, restorasyon çalışmalarında kullanılacak malzeme ve tekniklerin belirlenmesine yardımcı olabilecektir. Elde edilen sonuçlarla yapıya ait harç özelliklerinin belirlenerek restorasyon için

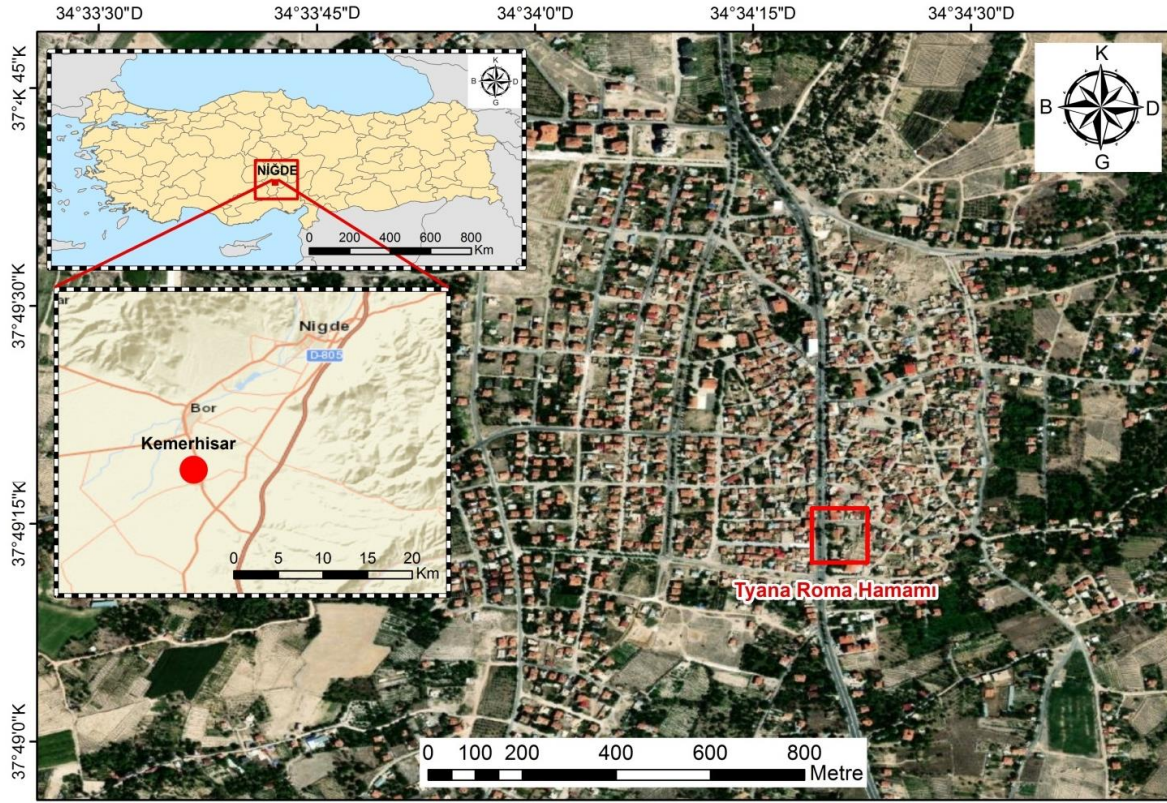
doğru harç malzemesinin seçimi yapının orijinal doğasının bozulmaması ve eski görünümünün tamamen değişmemesine neden olacaktır.

1.1 Tyana antik kenti tarihçesi

Hitit, Roma ve Bizans dönemi önemli şehirlerinden olan Tyana şehri Niğde Kemerhisar kasabasında kurulmuştur (Şekil 1). Niğde iline yaklaşık olarak 23 km uzaklıkta, Bor İlçesinin 5 km güneydoğusunda bulunan Tyana antik kenti, batıda Kızılırmak ve Tuz Gölü, doğuda Fırat Nehri, güneyde Toroslar ve kuzeyde ise Yozgat'a kadar uzanan bir kesimi kapsamaktadır. Antik dönemlerde Kapadokya Bölgesi'nde Kilikya'yı Kapadokya'ya bağlayan tarihi yolların üzerinde bulunması sebebiyle birçok defa farklı uygarlıklar tarafından ele geçirilmiştir. Antik kent Hristiyanlık döneminde Küdüs'e giden hacılar tarafından kullanıldığı için hacı yolu olarak da adlandırılmıştır [17]. Strabon, Tyana'nın güçlü sur duvarlarına sahip bir yerleşme olduğundan elverişli konumundan topraklarının düz ve bereketli olduğundan bahsetmektedir. Tyana kenti Strabon'a göre Kaisareia'dan (Mazaka/Kayseri) ayırt etmek için Tauros yakınlarındaki Eusebeia olarak adlandırılır. Bölgenin Seleukos hâkimiyetinden kurtarılmasından sonra Kapadokya Bölgesi'ndeki iki önemli kent olan Kaisareia (Mazaka/Kayseri) ve Tyana kenti V. Ariarathes Eusebes Philopator tarafından yeniden kurulmuştur [18,19]. Kaisareia (Mazaka/Kayseri) ve Tyana kenti Eusebeia (Argaios yanındaki Eusebeia) olarak adlandırılması kurucusuna ithafen verilmiş olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Eusebeia isminin verilmesi kutsal gölün yakınındaki Asbamaios tapınağında Zeus onuruna düzenlenen ayinlerle bağlantılı olduğu birçok araştırmacı tarafından ifade edilmiştir [20,21].

Roma imparatorluk döneminde Hadrianus'tan-Severuslar dönemlerinde kente verilen önem artmıştır. Septimius Severus'un Tyanalı Apollonius'a olan hayranlığı kentin öneminin artmasının en önemli nedenlerinden biri olarak görülmüştür. Daha sonraki dönemlerde de oğlu Caracalla da Apollonius'a büyük hayranlık duymuştur. Roma imparatorluk döneminde Severuslar zamanında kentte çeşitli imar faaliyetleri yürütülmüş ve bu imar faaliyetleri sırasında su kemerleri, Roma Havuzu, Zeus Asbamaios'a adanan bir tapınak, Roma Hamamı ve Heroon, başta olmak üzere çeşitli yapılar inşa edilmiştir. Caracalla'nın (MS 211-217) imparatorluğu sırasında oldukça önemli bir yere sahip olan Tyana, Colonia olarak belirlenmiş ve Antoniana Colonia Tyana olarak adlandırılmıştır [22]. Caracalla'nın kentin ismini Tyana'yı Colonia olarak belirlemesi ve kentin Suriye'ye uzanan stratejik bir konuma sahip oluşu, doğuya düzenleyeceği seferlerde kentin bulunduğu coğrafi konumdan faydalanma isteğinin sebebiyle olduğu düşünülmüştür [19].

Tyana'da Severuslar dönemine ait büyük ve çok sayıda kamu yapısı bulunmaktadır. İmparator Caracalla ve annesi Julia Domna'nın Tyana'ya oldukça önem vermiş ve çok çeşitli imar faaliyetleri gerçekleştirmişlerdir. Kentin güneyine doğru uzanan Su kemerleri İmparator Caracalla Döneminde yapıldığı ve kent için tepelerden su getirmek amacıyla yapıldığı düşünülmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanı haritası.

Söz konusu su kemerleri karmaşık bir hidrolik sistemi ile yapılmış olup şehirdeki tüm konutların faydalanabilmesi amaçlanmıştır. Köşk Höyük yakınlarında şehrin birkaç km kuzeydoğusunda kemerlerin su deposunun da bulunduğu 60x20 m boyutlara sahip olan Roma Havuzu'nun inşa edilmiş olabileceği düşünülmektedir [22–24].

Bölgede önemli bir kent olan Tyana ise yapılan araştırmalarda Hitit Çağında Tuwanuwa, Geç Hitit döneminde Tuwana, Pers ve Hellenler döneminde Dana, Roma İmparatorluk döneminde Tyana, Osmanlı İmparatorluğu döneminde Kilisehisar ve Cumhuriyet döneminde ise Kemerhisar olarak birçok farklı isimlerle bilinmektedir. Roma İmparatorluk döneminde Severuslar ile kente verilen değer artmış olup Roma Hamamı, Roma Havuzu ve Su kemerleri, başta olmak üzere çeşitli imar faaliyetleri sürdürülmüştür. Antik kentte inşa edilmiş Roma Hamamının suyu kentin kuzeydoğusunda Köşkhöyük yakınlarındaki Roma Havuzunda biriktirilen sularla ve su kemerleri vasıtasıyla kente getirilmekteydi. Severuslar dönemine MS 3. yüzyılda Roma hamamının mimari parçaları ise yapılmış olup, Bizans döneminde ise çeşitli yenileme ve eklemeler yapılmıştır.

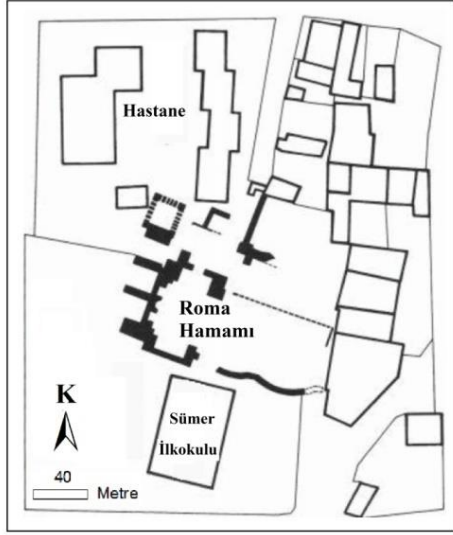
1.2 Tyana Roma hamamı

Tyana antik kentinde bulunan Roma Hamamı, güneyinde Sümer İlkokulu kuzeyinde ise bir sağlık ocağı bulunan 40x42 m boyutlarındadır (Şekil 2-3). Şekil 3'teki ortofoto kazı arşivinden alınmış olup, yüksek çözünürlüklü hava görüntülerinden gerçek yeryüzü koordinatlarına göre düzeltilmiş bir görüntüdür. Hamamdaki araştırmalar

şirasiyla, Alman araştırmacılar 1995 yılında, İtalyan araştırmacılar 2001-2004 yıllarında ve 2016 yılında ve halen de Niğde Müzesi başkanlığında Türk araştırma ekibi araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Severuslar döneminde mimari parçaları yapılmış hamamının Bizans döneminde ise çeşitli yenileme ve eklemeler yapılmıştır. Roma hamamlarının kökeni Yunan hamamlarıdır ancak Romalılar hamamı geliştirmişlerdir. Romalılar, hamam gibi yapılarda yerleşim yeri seçerken dikkat ettikleri en önemli kıstas, sıcak bir alanda olmasıdır bu sebeple kuzey ve kuzeydoğu rüzgârlarından uzak olmasına dikkat etmişlerdir. Ayrıca hamamın önemli bölümlerinden olan caldarium (sıcaklık) ve tepidarium (ılıkılık)'un mümkün olduğu kadar güneybatıdan ışık alması bir diğer önemli ölçüttür. Eğer bu şartlara uygun bir bölge bulunamazsa en azından güneyden ışık almasına özen gösterilmektedir. Bu nedenle, kentin kuzeydoğusunda bulunan Köşkpınar höyüğü yanında bulunan Roma Havuzunda biriktirilen sular ve konumu hamam yapısı için uygun görülmüştür. Roma hamamı 40*42 boyutlarında içerisinde beş geniş odası, basilica hamamı, banyo odaları gibi bölümlerden oluşmaktadır. Hamam içinde caldarium (sıcaklık) geçiş tepidarium (ılıkılık) ve öz konusu banyo odalarının ise frigidarium (soğukluk) ve tepidarium (ılıkılık) bazilika hamamı ile bağlantısı sağlanmıştır. Hamamdaki ısıtma ise kuzey tarafta bulunan ve caldarium ile basilika hamamı (basilica thermarum) arasında yer alan praefurnium (külhan) ile gerçekleştirilmiştir [23,24].

Yapılan arkeolojik araştırmalarda Roma hamamın üç tabarnae (dükkanlar), legnaia, praefurnium (külhan), apodyterium (soyunma odası), basilica thermarum (orta

salon), frigidarium (soğukluk), tepidarium (ılıkılık) ve caldarium (sıcaklık) bölümlerinden oluşan bir kompleks olduğu görülür. Kompleksi oluşturan bölümler doğu kısmında yan yana sıralı üç tabarnae, tabarnaenin arkasında legnaia ve caldarium, güneye doğru caldarium ile bitişik ve neredeyse aynı ölçülere sahip tepidarium ve frigidarium bölümleri kuzey kısmında aynı aks üzerine denk gelen basilica thermanum ve apodyterium yer almaktadır [24].



Şekil 2. Tyana Roma hamamı genel görünüm planı [22].



Şekil 3. Hamamın genel ortofoto görüntüsü [24].

1.3 Tyana çevresi jeolojisi

Çalışma alanı İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan Niğde ilinin Bor ilçesine 5 km uzaklıkta bulunmaktadır. Niğde yöresi güneydoğusunda Aladağlar ve güneyinde ise Bolkar Dağları olup Toridler ve Anatolidlerin bir araya geldiği alanı kapsamaktadır [25]. Niğde masifi, Niğde'nin güney doğusunda yer alır ve Orta Anadolu masifinin güney ucunu oluşturur [25]. Niğde masifindeki metamorfik kayaların tümü, Niğde grubu olarak adlandırılır ve litolojik özelliklerine göre Gümüşler, Kaleboynu, Aşığediği formasyonları ve Üçkapılı granodiyorit olarak farklılaştırılıp tanımlanmıştır [26].

Çalışma alanının temelini Niğde grubu kayalar oluşturmakta olup orta Anadolu Kristalin Kompleksi

metamorfik kayalarının güneyini oluşturmaktadır [25,27]. Bu kayalar orta-yüksek dereceli Paleozoik yaşlı metamorfik kayalardır. Bu metamorfik kayalara, Üst Kretase yaşlı ofiyolitler üzerlemiş durumdadır. Temele ait metamorfik ve ofiyolitik kayalar Üst Kretase-Paleosen yaşlı granitoidler tarafından sıcak dokanakla kesilmişlerdir [27,28]. Niğde Grubu kayaları Gümüşler, Kaleboynu ve Aşığediği metamorfiklerden oluşmakta ve Üç kapılı granitoidi tarafından kesilmektedir. Çalışma alanında bulunduğu Kemerhisar bölgesinde ise Niğde grubu metamorfikleri üzerinde diskordan olarak ignimbiritler, kireçtaşları ve travertenler Kızılkaya ignimbiritleri ve Gökbez formasyonu gelmektedir. Gökbez formasyonu Tyana çevresinde geniş alanlarda gözlenmektedir. Miyo-Pliyosen yaşlı Gökbez formasyonu marn-kireçtaşı-çamurtaşından oluşmuştur ve üst seviyelerinde bitüm ve traverten ara katlıları gözlenmektedir. Gökbez formasyonunun kalınlığı 50-150 m arasındadır [29]. Tyana Su kemerleri yapımında çalışma alanına yakın blok elde etmek için uygun olan Gökbez formasyonunun üst kısmından alınan travertenler kullanılmıştır. Kuzeyden güneye doğru Gökbez formasyonunun göl ortamında çökeldiği, çökeltme sırasında Niğde Grubu metamorfikleri ve Havuzlu ignimbiritinden malzeme aldığı, kuzeyde mikritik, güneyde sparitik ve batı kesimlerde ise omikritik kireçtaşlarının çökeldiği saptanmıştır [30,31].

2 Materyal ve metot

Tarihi yapıları oluşturan malzemeler görsel olarak incelendiğinde oldukça dayanıklı olduğu düşünülmektedir. Ancak yapıyı oluşturan malzemeler iklimsel, çevresel, atmosferik gibi çeşitli etkilerle, kırık, çatlak, tuzlanma, parça kaybı, vb. gibi bozulmalara maruz kalarak tahrip olmaktadır. Bu çalışma, tarihi Roma Hamamı'ndan praefurnium (külhan), basilica thermanum (orta salon), caldarium (sıcaklık) bölümlerinden alınan harç örneklerinin malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Roma Hamamı'ndan alınan harç örnekleri, öncelikle görsel olarak yerinde incelenmiş, mevcut bozulma türleri gözlemlenmiş ve örnekler gruplandırılmıştır. Daha sonra analizler için uygun hale getirilen numuneler amaca yönelik olarak basit ve ileri analiz teknikleriyle, tarihi Roma Hamamı harçlarının nitelikleri belirlenmiştir. Bu kapsam da Roma Hamamı örneklerinin petrografik özelliklerinin belirlenerek ve örneklerin içyapıları, farklı mineral türleri ve yapısal düzenlemeleri detaylı bir şekilde incelenmek için ince kesitler yaptırılmıştır. Petrografik analizler sonucunda belirlenemeyen ve küçük boyutlu minerallerin kimyasal yapılarını belirlemek için, örnekler X-Işınları Difraktometre (XRD) analizine tabi tutulmuştur. XRD analizi, örneklerdeki kristal yapıları ve minerallerin kimyasal bileşimleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlamaktadır. Harç örneklerinin kimyasal bileşimlerini belirlemek için X-Işını Floresans (WD-XRF) analizi yapılmıştır. Bu analiz ile harçların elementel bileşimleri tespit edilerek, örneklerin kimyasal bileşenleri ve mineralojik yapıları, dayanım özellikleri ve kireç türü (kategorisi) Cementation Index verileri değerlendirilmiştir. Bu analizlere ilaveten örneklerin fiziksel özelliklerini belirlemek için, özgül ağırlık, suda çözünen toplam tuz

içeriği, iletkenlik ve pH deneyleri, agregaların tane boyutu dağılımlarının belirlenmesi için granülometrik analizler uygulanmıştır.

2.1 Fiziksel testler

2.1.1 Özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık tanelerin kuru ağırlığının, taneler ile aynı hacimdeki ve 20 °C sıcaklığındaki suyun ağırlığına oranı olarak bilinmektedir. Hesaplanan özgül ağırlık değeri birim hacim ağırlık, malzemenin boşluk oranı ve doygunluk derecesi gibi ağırlık-hacim ilişkisinin belirlenmesinde kullanılan bir parametredir. Harç örneklerinin piknometre yöntemi ile özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Özgül ağırlık deneyi BS1377, TS 1900 [32] standartlarına uygun yapılmıştır. Analiz, Aksaray Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.1.2 Tane boyu dağılımı/granülometrik analizler

Harç ve sıvalarda tane boyu dağılım analizi örnek içerisindeki bağlayıcı kısım ve karbonatlı agregalar dışındaki silikatlı agregaların oranları, nitelikleri ve boyut dağılımlarının saptanması amacıyla yapılır [33,34]. Bu çalışmada tane boyu dağılımı analizi sadece belirtilen harç örneklerinin agrega içindeki çakıl, kum, silt-kil oranlarının tespiti ve agregaların boyutlarını belirlemek için yapılmıştır [35]. Tanelerin belirli büyüklükteki delik veya açıklıklardan geçebilme veya geçememe özelliğine dayanarak yapılan bir sınıflandırma işlemi olan elek analizi ile numunenin hangi boyutta ne kadar malzeme içerdiği tane boyu dağılımı ile tespit edilmektedir. Agregada içindeki çakıl, kum, silt-kil oranlarının tespiti için yapılan granülometrik elek analizi 25.00 mm. 19.00 mm. 9.50 mm. 4.75 mm. 2.00 mm. 0.850 mm. 0.250 mm. 0.106 mm. 0.075 mm ASTM D2487-2000 [36] standartlarında kullanılan elek açıklıkları kullanılarak eleme gerçekleştirilmiştir [37]. Bu yöntemde, analiz edilen örnek, elek açıklıkları farklı olan ve üstten alta doğru gittikçe elek çapı küçülecek şekilde üst üste yerleştirilerek eleme işlemi yapılır. Eleme işlemi sonunda elekler sırasıyla çıkarılıp, her bir eleğin üstünde kalan örnek miktarı tartılarak tane boyuna ait toplam elekten geçen yüzde ağırlık değerleri hesaplanır. Elekten geçen malzeme oranı logaritmik olarak diyagramda gösterilerek tane boyutu dağılım eğrisi elde edilir. Roma hamamı harç örnekleri için yapılan elek analizi Aksaray Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.1.3 pH ve iletkenlik testleri

Tarihi yapılara ait harç örneklerinin bünyesindeki farklı malzeme türlerinin içeriğinde kapillarite sonucu su ile taşınan tuzlar, doğal olarak, malzemenin kendi bünyesindeki tuzlar ve ilişkide bulunduğu malzemedeki kimyasal dönüşümler hakkında bilgi vermektedir [5]. Roma hamamı için belirlenen örnekler öğütücü ile toz haline getirilerek 25 ml su içerisine alınan 5 gram örnek hazırlanarak üzerine standart sodyum heksametafosfat eklenmiştir. Hazırlanan örnekler Jenway marka kondüktometri iletkenlik aleti ile pH ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. pH analizi için ISO

10523 [38], iletkenlik analizi için ISO 7888 [39] standardı kullanılmıştır. Harç örneklerinin gözeneklerinde ve yüzeyinde bulunan tuz miktarı ve ortamın pH değeri nicel olarak belirlenmiştir [40,41]. Analizler, Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma (ASÜBTAM) Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.1.4 Petrografik ince kesit yapımı optik mikroskop incelemeleri

Petrografik incelemelerde doku, mineraller, bileşenler ve matris (hamur) hakkında tanımlamalar yapılmaktadır [37,42,43]. Bu petrografik tanımlamalarla harç örneklerinin içerdikleri agregaların türleri, bağlayıcı-agrega oranları, belirlenerek muhtemel kaynak alanları üzerine öneriler yapılabilir. Ayrıca örneğin mineral içeriği, dokusu varsa ayrışma, bozunma özelliklerin tespit edilmesi ile yapıda kullanılacak malzemeler için önerilerde bulunulabilir [37].

Petrografik analizler ince kesitler üzerinden yapılmaktadır. İnce kesitlerin hazırlanması için örnekler kesici çarklar vasıtasıyla kibrit kutusu ebatlarına getirilerek döner disk yardımıyla düzgün yüzeyler elde edilir. Oluşturulan düzgün yüzeylere epoksi türü yapıştırıcı ile lam yapıştırılarak örnekler ince kesit aletinde 0.03 mm inceliğe kadar incelenmektedir. İnce kesit yapımı için seçilen parçanın örneğin tamamının yansıtmasına dikkat edilmelidir. Özellikle tarihi yapılarda örnek elde etmek zor olması sebebiyle alınan parçanın bütünü yansıtmasına özen gösterilmelidir. Hazırlanan ince kesitler üstten ve alttan aydınlatmalı Leica DM750P model optik mikroskop ile Aksaray Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Laboratuvarı'nda incelenmiştir. Örnekler için mikrofotograf çekimi mikroskoba bağlı dijital kamerayla kullanılarak yapılmıştır.

2.1.5 X-Işınlı Floresans Spektrometresi (WD-XRF) analizleri

X-Işınlı Floresans spektroskopisi (XRF), analiz edilen malzemenin elementel bileşimin belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden biri olup kantitatif analiz yapar. XRF'in çalışma prensibi X-ışınlarına maruz kalan örneklerden elde edilen karakteristik X-ışınları yansımalarıyla örneklerin kimyasal analizi yapılmaktadır. Temel olarak ölçülen her elementin gösterdiği floresans ışınları dalga boyu o element için ayırt edicidir ilkesine dayanır. Roma hamamına ait harç örneklerinin kimyasal bileşimi WD-XRF yöntemiyle tespit edilmiştir. Analizler ASÜBTAM bünyesindeki Jeokimyasal Analiz Laboratuvarı'nda (JAL) Panalytical Axios Max marka WD-XRF cihazında gerçekleştirilmiştir. WD-XRF cihazı yüksek flexibility için mikroilemci kontrollü cihaz yüksek performanslı SSD-max Rhanodlu ve ultra ince Berilyum pencere (75 µm) x-ray tüpüne sahiptir. Tüp 4 kW maximum güç ve 160mA maximum akımda çalışabilmektedir [44]. Analiz için belirlenen harç örnekleri öncelikle kırıcı cihazlarında kırılıp, bilyeli öğütücülerde yaklaşık 20 mikron boyutuna kadar toz haline getirilmektedir. Öğütülen ve toz haline getirilen örnekler bağlayıcı malzeme ile karıştırılıp 12 bar basınç ile preslenerek pellet haline getirilmektedir. Hazırlanan pellet örnekleri Dalga boyu ayırıcı X Işını Fluorescence (WD-XRF) tekniği ile ana ve iz element

analizleri ölçümleri yapılmaktadır. Örneklerin ateşte kayıplarının belirlenmesi için porselen krozelere konulan örnekler etüvde 800°C sıcaklıkta bekletilerek etüv sonrası tekrar ölçümleri sağlanarak ateş de kayıpları hesaplanmıştır. Analizler ASÜBTAM Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.1.6 XRD analizleri

X-Ray Diffraction (XRD) spektroskopisi, yani X-ışını kırınımı, bir maddenin kristal yapısal özelliklerini incelemek için kullanılan bir analitik tekniktir. XRD çalışma prensibi, X-ışınlarının bir maddeye çarptığında, madde tarafından saçılan X-ışınlarının belirli açılarda kırınımının gözlenmesine dayanır. XRD analizinde, kristal yapıya sahip bir madde, X-ışınları ile aydınlatılır. X-ışınları, madde atomlarının elektronları ile etkileşir ve madde tarafından saçılır. Saçılan X-ışınları, belirli açılarla kırılır ve bir dedektör tarafından kaydedilir. Analizi yapılacak numune öncelikle öğütücülerde boyutta toz haline getirilerek, toz haline gelen örnek dik preslenerek analize uygun hale getirilir. Toz X-Ray difraksiyon tekniği ile edilen analiz sonuçları hazırlanmış kataloglar yardımıyla elde edilmiş pikler ile karşılaştırma yapılarak hangi minerale ait olduğu belirlenmektedir. XRD analizi dalga boyu $\lambda = 1,788970 \text{ \AA}$ olan Co tüpü kullanılan Inel Equinox 1000 cihazında gerçekleştirilmiştir. 5 mm x 300 mm açıklığa sahip difraktometrede X-ışınları 6°'lik bir açıyla numuneye düşürülür [45,46]. Mikroskopik analizlere ek olarak yapılan XRD analizi, farklı tipteki agregalarının mineralojik olarak tanımlanmalarının yapılabilmesi için uygun bir yöntemdir. Petrografik sonuçlar ve XRD analiz sonuçları kombinasyon uygulanabilir ve bağlayıcı tanımlaması yapılabilir. XRD analizleri Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular

Harç, yapıyı oluşturan unsurların malzemesini bir arada tutan kireç ve çakıllı bağlayıcı malzeme, sıva ise yapının duvarlarındaki harç, taş ve tuğla malzemelerinin üzerine atılan çakıl, kum, kil, kireç vb. malzemedir. Tarihi yapılardaki harç ve sıva örneklerinde malzemenin fiziksel ve kimyasal bileşimsel özellikleri tarihi yapının koruma ve onarım çalışmalarında başarılı olunması açısından oldukça önemlidir. Roma hamamına ait praefurnium (külhan), basilica thermarum (orta salon), caldarium (sıcaklık) bölümlerinden alınan harç örnekleri fiziksel, kimyasal ve petrografik bileşimsel özelliklerini belirlemek amacıyla kapsamlı bir arkeometrik incelemeye tabi tutulmuştur. Arkeometrik incelemelerde malzemelerin özelliklerinin anlaşılması tarihi yapının koruma ve onarım çalışmaları için büyük önem taşımaktadır.

Harç örnekleri hem saha hem de laboratuvar ortamında görsel olarak incelenmiş ve malzeme türlerine göre gruplandırılması gerçekleştirilmiştir. Örneklerin incelemeleri doğrultusunda, harçların fiziksel, kimyasal ve petrografik özelliklerinin belirlenebilmesi için materyal metot kısmında detaylı anlatılan analizler gerçekleştirilmiştir. Roma hamamından alınan örneklerden yapılan fiziksel testlerden özgül ağırlık değerleri **Tablo 1**'de ve granüloметриk analiz sonuçları ise **Şekil 4**'te

gösterilmiştir. Roma hamamı basilica alanından alınan örneğin özgül ağırlık değeri 2.61 g/cm^3 , calderium alanından alınan örneğin özgül ağırlık değeri 2.51 g/cm^3 külhan alanından alınan örneğin özgül ağırlık değeri ise 2.65 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Harç örneklerinin özgül ağırlık hesaplamaları.

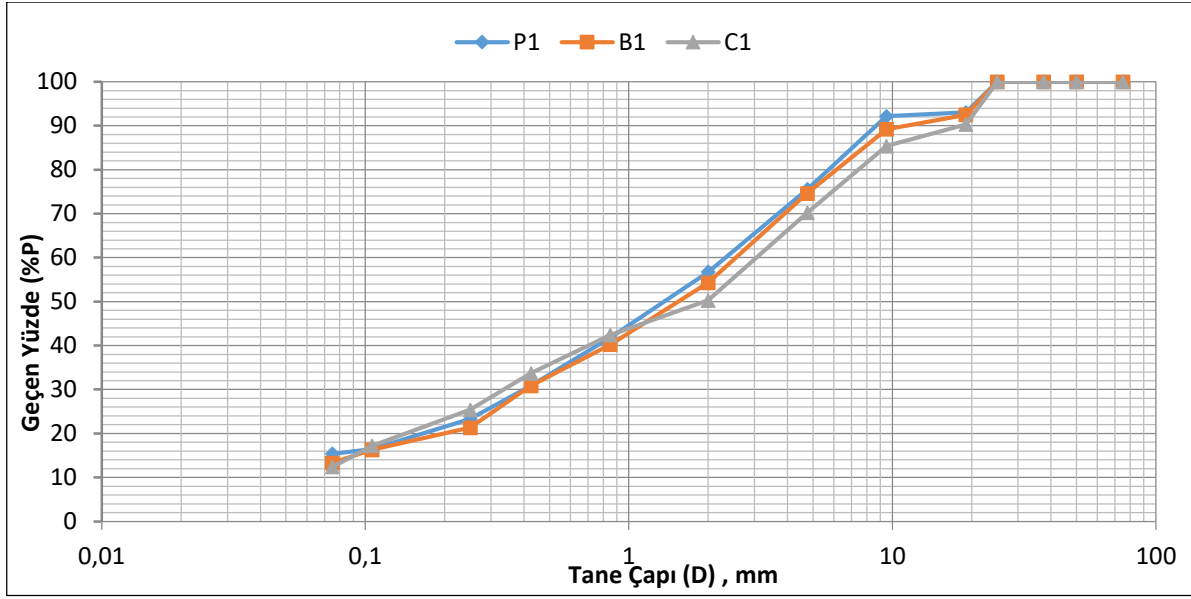
Örnek	Basilica Thermarum	Calderium	Praefurnium (külhan)
Numunenin özgül ağırlığı (Gs)	2.61 g/cm^3	2.51 g/cm^3	2.51 g/cm^3

Tarihi yapı için yapılan tüm analizler yapıya zarar vermeden, hassasiyet gösterilerek alınmış olup, belirli miktarlarda örnek alınabilmiştir. Belirlenen üç harç örneğinin agrega boyutunu belirlemek için ayrı ayrı elek analizi yapılmış olup tane boyu ve agrega dağılımı değerlendirilmiştir. Harç örneklerinin tane boyu dağılımı belirlemek için yapılan elek analizi sonuçları Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi Unified Soil Classification System-(USCS) ASTM D2487-2000 [36] standardında sınıflandırılmış olup harç örneklerinin tane boyu dağılımı kötü derecelenmiş siltli-kum (SM) ve kötü derecelenmiş killi kum (SC) olarak bulunmuştur. Elek analizi sonuçları ile de örneklerin granüloметриk eğriler çizilmiş olup sonuçlar **Şekil 4**'te gösterilmiştir.

Harç örneklerinin bünyesindeki farklı malzeme türlerinin içeriğinde doğal olarak yer alan veya kapilarite sonucu su ile taşınan tuzlar, malzemenin kendi bünyesinde ve ilişkide bulunduğu malzemedeki kimyasal dönüşümleri belirlenebilmektedir [35]. Örneklerin pH ölçümleri ortalaması 8.81 olup 8.54-9.12 arasında değerlere sahiptir ve bu değerler örneklerin bazik özellikte olduğunu göstermektedir (**Tablo 2**). Örneklerin tümünün bazik özellik göstermesinin kireç bağlayıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Örnekler içinde en yüksek iletkenlik basilica örneğine ait, en düşük iletkenlik özelliği gösteren örnek ise külhan örneğine aittir. Kondaktometrik iletkenlik analiz sonuçlarına göre harç örneklerinin yüksek derecede toplam tuz içeriklerine sahip olduğu gözlenmektedir (**Tablo 2**).

Tablo 2. Roma Hamamı harç örneklerinin iletkenlik ve pH ölçümleri.

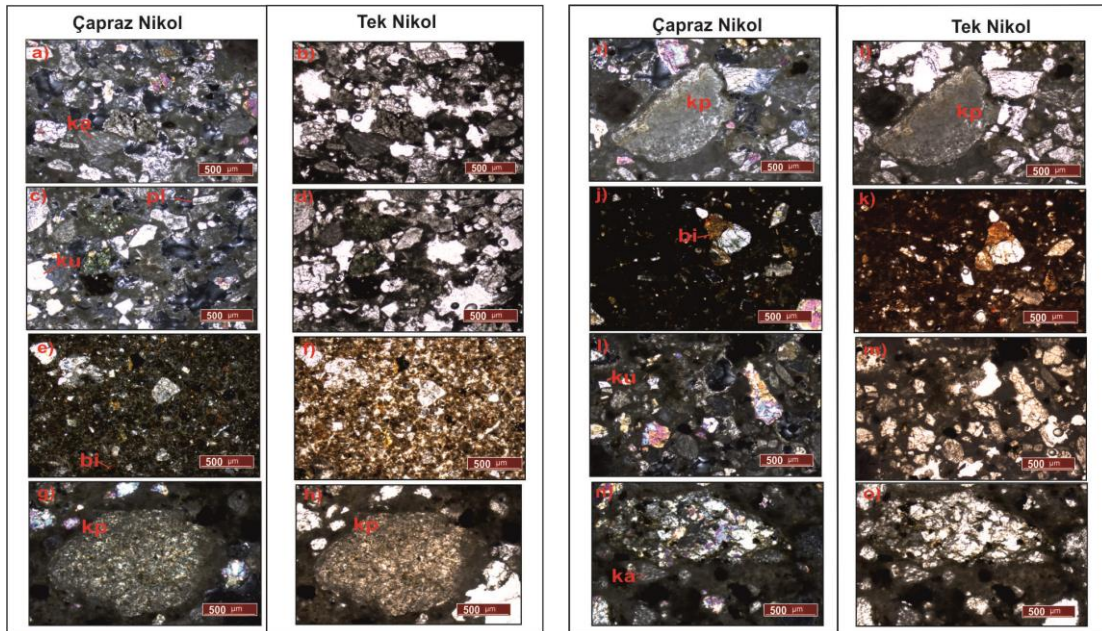
Örnek adı	İletkenlik (EC) ($\mu\text{s/cm}$)	pH
Basilica	9470	9.12
Caldarium	6820	8.78
Külhan	12520	8.54



Şekil 4. Örneklerin granülometrik analiz sonuçları (P1: Praefurnium (Külhan), B1: Basilica, C1: Caldarium).

Harç örneklerinin mineralojik ve petrografik özellikleri incelendiğinde, örneklerde genel olarak mineral, litik, ve bağlayıcı olmak üzere üç farklı bileşen gözlenmektedir. Örneklerde gözlenen mineral bileşenleri kuvars, plajiyoklas, kalsit, muskovit, opak mineraller ve kayaç parçalarıdır (Şekil 5). Litik bileşenler çoğunlukla (Şekil 5 g, h, i, j), traverten, kumtaşı, kireçtaşı kayaç parçalarından oluşmaktadır. Ayrıca az da olsa tuğla ve kiremit parçaları da litik bileşen olarak görülmüştür. Örneklerde gözlenen litik bileşenlerin Tyana antik kenti çevresi jeolojisi ve çevredeki kayaç parçaları

(traverten, kireç taşı, kumtaşı) ile uyumlu olduğu görülmektedir [47]. Petrografik incelemelerde harç örneklerinin bağlayıcısının kireç olduğu saptanmıştır. Tyana antik kentinde bulunan yapı taşlarının %75'inin sedimanter (kireçtaşı, traverten, kumtaşı), %20 metamorfik (gnays, mikaşist) ve %5'ininde magmatik (andezit, serpantinit, gabro,) kökenli olduğu daha önce yapılan çalışmalarda araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [30,31,47]. Roma hamamına ait harç örneklerinin polarizan mikroskop altında çekilmiş mikro fotoğrafları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Harç örneklerinin polarizan mikroskop altında çekilmiş mikro fotoğrafları (ka: kalsit, kp:kayaç parçası, ku: kuvars, bi: biyotit) (a, c, e, i, j, l, m tek nikol görüntüsü, b, d, f, h, i, k, m, o: çapraz nikol görüntüsü).

Tablo 3. Harç örneklerinin ana oksit jeokimyasal sonuçları.

Örnek	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cl	LOI	TOPLAM
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Külhan	0.34	0.44	1.33	7.17	0.10	1.19	28.81	0.16	0.00	0.05	1.76	39.36	0.41	19.60	100.73
Calderium	0.23	0.14	0.21	1.28	0.03	0.34	54.8	0.02	0.001	0.003	0.23	0.22	0.34	43.5	101.37
Basilica	0.51	0.81	2.88	17.08	0.46	1.74	41.75	0.28	0.011	0.07	2.49	5.7	0.8	24.9	99.5

Tarihi yapıya ait harç örneklerinin element içerikleri WD-XRF ile belirlenmiştir. Harç örneklerine ait jeokimyasal analiz sonuçları **Tablo 3**'te verilmiştir.

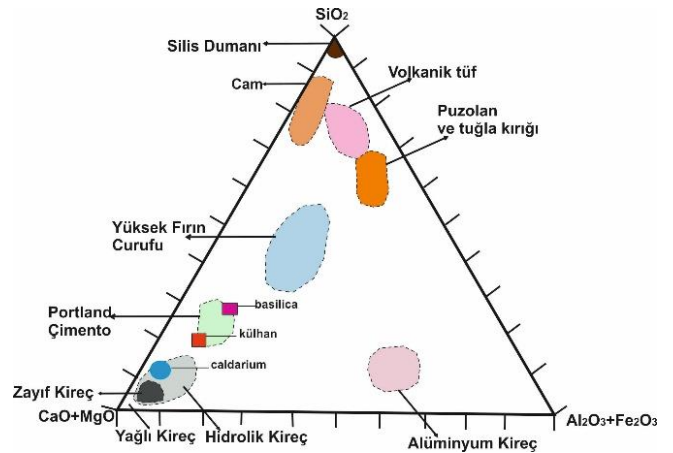
Örneklerdeki Al₂O₃, K₂O ve Na₂O gibi elementler, feldispat gurubu, mika ve kil minerallerini Fe₂O₃, TiO₂ ve MgO gibi elementler ise piroksen grubu amfibol grubu ve klorit minerallerini işaret etmektedir. Örneklerin düşük Na₂O, Al₂O₃ ve K₂O değerleri ve yüksek CaO içeriği yüksek olması kalsit ve kireç bağlayıcıdan oluştuğunu göstermektedir. Külhan örneğinin diğer örneklere göre SO₃ değer oldukça yüksektir. Bu durum bu örneğin sülfat içerikli bir bağlayıcı kullanılmış olması ile ilişkilendirilir. MgO değerleri tüm örnekler de çok yüksek olmadığı gözlenmektedir. Harç içerisinde MgO'in fazlalığı dolomitik kireçtaşını CaMg(CO₃)₂ ifade etmesi sebebiyle harç için uygun olmamasından dolayı tercih edilmemektedir. Harç örneklerin kimyasal analizi ile elde edilen kireç türleri ve dayanım özellikleri ile ilgili fikir veren Cementation Index (CI) değerleri ile örneklerin tamamen benzer özelliklerde olduğunu göstermiştir (**Tablo 3**). Roma hamamına ait harç örneklerin CI değerleri 0.34-0.80 değerleri arasında değişim gösterirken, kireç türü olarak zayıf hidrolik kireç ile hidrolik kireç katsayısında veriler sunmaktadır. Harç örneklerinin CI verileri örneklerin dayanımları ile ilgili veriler sağlamakta ayrıca yüksek CI verileri örneklerin hidroliklik özelliğini göstermektedir (**Tablo 4**). Roma hamamına ait incelenen harçlar oldukça düşük değerlerde CI verilerine yani oldukça düşük dayanımlara sahiptirler. CI değeri düşük olan harçlar CaO oranı yüksek ve toplamdaki agrega içeriği %5'in altında, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oranı da kısmen yüksek olan hidrolik özelliği olan harçlardır [**48**].

Tablo 4. Harç örneklerinde CI.

Kireç türü	CI
Yağlı Kireç -YK	< 0.30
Zayıf hidrolik kireç - ZHK	0.30-0.50
Ortalama Hidrolik Kireç- OHK	0.51-0.70
Hidrolik Kireç	0.71-1.11
Doğal Çimento-DC	1.11-1.70
Doğal Çimento/Çimento	1.70 <

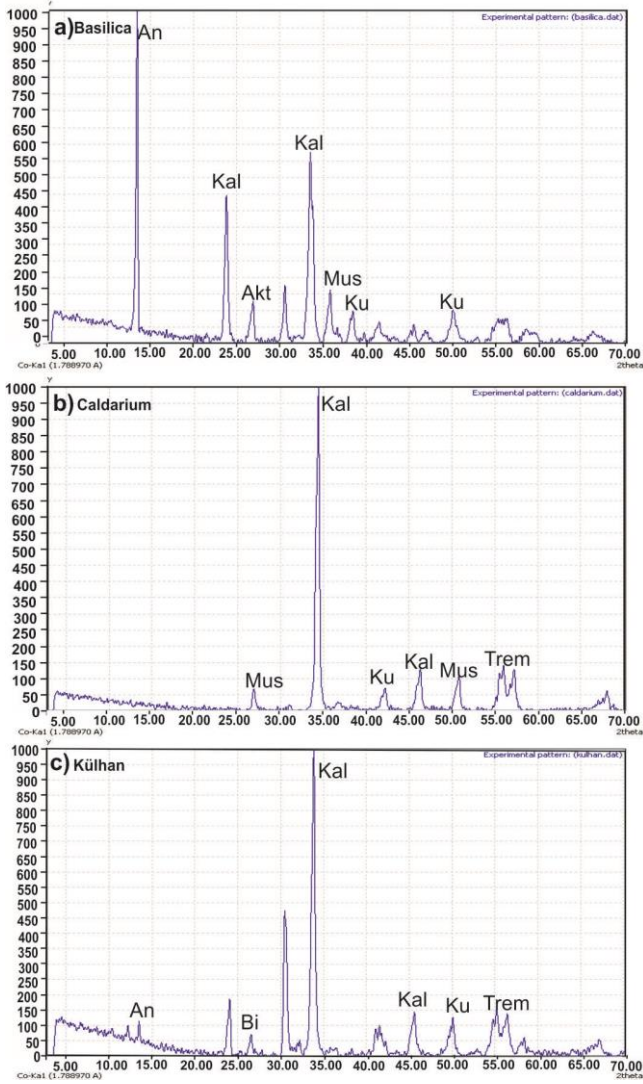
Yapılan tarihi harç çalışmalarında agrega içeriğine bağlı olarak yağlı harç, hidrolik harç ya da çimentolaşma özelliğindeki harç ayrımı yapılmaktadır. Agrega içeriği %5'in altında olan ve CaO oranı yüksek harçlar yağlı harçlar, agrega oranı %5'in üzerinde olan ve CaO oranı düşük olan

harçlar ise hidroliklik özelliği olan harçlardır. Ayrıca bu tür harçların birleşiminde yüksek oranda demir (Fe₂O₃), silisyum (SiO₂) ve alüminyum (Al₂O₃) bulunmaktadır. Calderiuma ait örneğin; CaO içeriği %54.8 Al₂O₃ içeriği %0.21; Fe₂O₃ içeriği %0.23 ve SiO₂ %1.28 oranlarına sahip iken; Külhan ve Basilica örneklerinde, CaO içeriği %28.81-41.25, Al₂O₃ içeriği %1.33-3.88, Fe₂O₃ içeriği %1.76-2.49 ve SiO₂ içeriği %7.17-18.08 aralığındadır. Buna göre Külhan ve Basilica örneklerin CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve SiO₂ değerleri Calderiuma örneğinden farklı olup bu farklılık bağlayıcısının kimyasal kompozisyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Analizleri yapılan harç örnekleri kimyasal içeriklerine ve oksit bileşik oranlarına göre Keily diyagramında (SiO₂-CaO+MgO-Al₂O₃+Fe₂O₃) gösterilerek gruplandırılmış calderium örneği hidrolik kireç alanına basilica ve külhan örneği ise portland çimento alanlarında gözlenmiştir [**49**] (**Şekil 6**).



Şekil 6. Roma hamamı harç örneklerinin Keily diyagramındaki konumları [**49**].

Harç örneklerinden optik mikroskop altında belirlenmeyen daha küçük parçalar için XRD analizi yapılmıştır. Yapılan XRD analizlerine göre harç örneklerinin baskın olarak kuvars ve kalsit pikleri gözlenmekte olup tremololit, biyotit, muskovit ve kaolin mineral pikleri de gözlemlenmiştir (**Şekil 7**). Kuvars minerali kullanılan agregalarının genellikle silisyum mineralini içerdiğini gösterirken, kalsit minerali bağlayıcı olarak kirecin kullanıldığını göstermektedir [**50**]. Elde edilen XRD sonuçları petrografik sonuçlarla uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Örneklerin XRD analiz sonuçları a) Basilica örneği b) Calderium örneği c) Külhan Örneği (An: Anhidrit, Kal: Kalsit, Trem: Tremolit, Mus: Muskovit, Bi: Biyotit, Ku: Kuvars).

4 Tartışma ve sonuçlar

Bir restorasyon çalışması için arkeometrik analizler hem belgeleme hem koruma/onarıma yönelik uygulamalar için oldukça önemli bir role sahiptir. Bu çalışma, Tyana Roma Hamamına ait harç örneklerinin korunmasına/onarımına yönelik olarak gerçekleştirilen arkeometrik analizler ile elde edilen veriler üzerinden yapılacak restorasyon uygulamaları için örnek bir çalışmadır. Tyana antik kenti içerisinde yapılan hem farklı, hem de bir ilk çalışma olarak alanda yerini alacak uygulamalar içeren bir nitelik taşımaktadır. Arkeometrik çalışmalar kapsamında örnekler üzerinde temel fiziksel analizler, kimyasal analizler ve petrografik analizler yapılmıştır. Yapılan kimyasal analizler aracılığıyla malzeme bileşiminin belirlenmesi ile harçların kimyasal bileşimindeki değişiklikleri tespit ederek, farklı yapım aşamalarında veya farklı kullanım dönemlerinde yapılan değişikliklere dair ipuçları sağlanabilmektedir. Bu kapsamda yapılan petrografik analizler, harç örneklerindeki minerallerin ve agregaların türünü, yoğunluğunu, kristal yapısını

belirleyebilir, restorasyon malzemelerinin doğru seçimini ve uygulanacak restorasyon stratejilerini belirlemeye yardımcı olabilir. Roma hamamı örneklerinin petrografik incelemelerinde içerisinde litik bileşenler (Kumtaşı, kireçtaşı, traverten vb.) mineralojik bileşenler ve bağlayıcı olmak üzere üç bileşenden oluştuğu, örnekler içerisindeki litik bileşenlerin (Kumtaşı, kireçtaşı, traverten vb.) Tyana antik kenti çevresinin jeolojik yapısıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca XRD analiz sonuçları ile mineral ve bağlayıcı özellikleri petrografik özelliklerle uyumlu olduğu görülmektedir. Roma hamamı örneklerinden yapılan kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında düşük Na_2O , K_2O ve Al_2O_3 değerleri ve yüksek CaO değeri göstermesi kalsit ve kireç bağlayıcıya işaret etmektedir. Kimyasal analiz sonucuna göre örneklerin CI değerleri 0.34-0.80 değerleri arasında değişim gösterirken, kireç türü olarak zayıf hidrolik kireç ile hidrolik kireç katıysısında veriler sunmaktadır. Örneklerin kimyasal analiz sonuçlarına göre belirlenen hidrolik kireç türü, su ile tepkimeye girerek sertleşir ve dayanıklı bir yapı oluşturur. Ancak, "zayıf hidrolik kireç" su ile sınırlı bir tepkime gösterir ve düşük mukavemetli bir yapıya neden olabilir. Zayıf hidrolik kireç içeren yapıların restorasyon çalışmasında daha yüksek hidrolik özelliklere sahip kireç harçları tercih edilerek, restorasyonun dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü sağlanabilir. Ayrıca, harç örnekleri için yapılan fiziksel analizler, harcın dayanıklılığı, su geçirgenliği, agrega boyutu gibi önemli mekanik özellikleri hakkında bilgi sağlayarak, yapıdaki hasarın nedenlerini ve yayılımını anlamada yardımcı olabilir. Roma hamamı harç örneklerinin pH özelliği bazik ortamı temsil etmekte ve iletkenlik 6820-12520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında olduğu görülmektedir. Restorasyon projelerinde harçların iletkenlik değeri, düşük olması tercih edilir. Bu nedenle, verilen değerlere yakın veya daha düşük iletkenlik değerlerine sahip harçlar, restorasyon projelerinde kullanılmak için tercih edilebilir. pH değerleri ise orijinal yapı malzemeleri ile kimyasal olarak uyumlu olması beklenir. Restorasyon süreçlerinde pH değeri bazik olan harçlar, yapı malzemelerine bazik bir ortam sağlayarak, asidik etkilere karşı koruyucu bir bariyer oluşturabilir. Restorasyon süreçlerinde kullanılan harçların agrega (kum, çakıl, taş vb.) tane boyu, harcın fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini etkileyebilir ve restorasyonun başarıyla tamamlanması için önemli bir faktördür. Roma Hamamı harç örneklerinde belirlenen silt-kil agrega boyutu genellikle düşük dayanıklılığa sahip olup harcın dayanıklılığını etkileyebilir.

Tüm bu bilgiler kapsamında Tyana Roma hamamı harç özellikleri Anadolu'da yer alan Roma dönemine ait bir diğer yapı olan Sagalassos Antik Kenti'ndeki Roma hamamına ait harçlarının analizi ile karşılaştırılmıştır [51,52]. Roma döneminde inşa edilen bu iki hamamın harç özellikleri benzer özellik göstermekte ve hamamların inşasında kullanılan malzemelerin çoğu, kireç, kum ve çakıl gibi doğal malzemeler olduğu görülmektedir. Roma dönemine ait yapıların harç özellikleri ve malzeme kullanımı, her ne kadar Roma İmparatorluğu geniş topraklara sahip olsa da inşa edilen yapılarda kullanılan harçların benzer malzeme ile yapıldığı gözlenmektedir.

Sonuç olarak Tyana antik kenti Roma Hamamı'na ait, arkeometrik harç analizleri, yapının restorasyon ve koruma süreçlerinde önemli bir rolü olduğu, yapıya ait harç bileşimlerinin ve özelliklerinin, orijinal yapı malzemelerini anlamak, restorasyon ve bakım onarım çalışmalarını daha doğru ve uygun bir şekilde yaklaşım yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine ve örneklerin kullanımına izin veren Tyana Kazı başkanı Prof. Dr. Osman DOĞANAY'a ve kazı ekibine, yapılan analizler için Aksaray Üniversitesi Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'na, Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma (ASÜBTAM) Laboratuvarı'na, Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM)'ne ayrıca makaleye yapıcı yorumları ile katkıda bulunan hakemlere ve editöre teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] G.Ö. Kuşçuoğlu, M. Taş Sürdürülebilir Kültürel Miras Yönetimi. *Journal of Yalvaç Academy* 2, 58–67, 2017.
- [2] E. Uğurlu, H. Böke, Tarihi Yapıların Özgün Değerleri ile Korunması. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi* 1, 17–19, 2009.
- [3] A.A. Akyol, Y.K. Kadioğlu, Ş. Demirci, Zeugma (Gaziantep) Antik Kenti duvar resimleri arkeometrik çalışmaları. *Anadolu University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering* 12, 37–56, 2011.
- [4] M. Aydın, H. Tanrikulu, S. Tetiker, Şanlıurfa-Hacı Yedigâr Camii restorasyon amaçlı yapı malzemelerinin arkeometrik özelliklerinin incelenmesi. *Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi* 24, 238–247, 2019. <https://doi.org/10.22520/tubaar.2019.24.012>.
- [5] B. Duman, T. Koralay, Y.K. Kadioğlu, A.A. Akyol, Tarihi harç ve sıva örneklerinin çoklu analitik yöntemler kullanılarak incelenmesi: Tripolis (Yenice/Denizli) örneği. 31. Arkeometri Sonuçları Toplantısı 2016.
- [6] J. Hormes, A. Diekamp, W.Klysubun, G.L. Bovenkamp, N. Börste, The characterization of historic mortars: a comparison between powder diffraction and synchrotron radiation based x-ray absorption and x-ray fluorescence spectroscopy. *Microchemical Journal* 125, 190–195, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.microm.2015.11.034>.
- [7] Martín Sánchez, M.J.Nuevo, M.A. Ojeda, S. Guerra Millán, S. Celestino, E. Rodríguez González, Analytical techniques applied to the study of mortars and coatings from the tartessic archaeological site "El Turuñuelo" (Spain). *Radiation Physics and Chemistry* 167, 108341, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.05.031>.
- [8] M. Bayazit, D. Yıldız, Fatih Paşa Cami (Diyarbakır) sıva ve harç örneklerinin arkeometrik karakterizasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 10, 709–720, 2019. <https://doi.org/10.24012/dumf.408838>.
- [9] C. Yalçın, Mor Kuryakos Manastırı (Batman) harç, sıva ve taş örneklerinin arkeometrik tekniklerle incelenmesi. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 2021.
- [10] A.A. Akyol, Y.K. Kadioğlu, Hasankeyf Artuklu Köşkü arkeometrik çalışmaları. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi* 1, 29–42, 2012.
- [11] M. Zeybek, A. Kaya, Tarihi yığma kiliselerde hasarların fotogrametrik ölçme tekniğiyle incelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi örneği. *Geomatik* 5, 47–57, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.568584>.
- [12] Güleç, G. Emre, Sultanahmet Büyük Saray kazıları kalıntıları harç sıva analizleri. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi* 1, 50–60, 2009.
- [13] M. Yılmaz, S. Tek, Antalya Yivli Minare ve Camisinin restorasyon, güçlendirme ve zemin etüt çalışmaları. *MASROP E-Dergi* 12, 49–72, 2018.
- [14] İ. Ciritci, G. Yücel, Ani yağışlar ve su baskını riski altındaki tarihi yapılar İstanbul Tarihi Yarımada: Ahi Çelebi Camisi. *Academic Perspective Procedia* 2, 172–181, 2019. <https://doi.org/10.33793/acperpro.02.02.23>.
- [15] H. Günöz, Kapadokya bölgesi bizans dönemi kaya kiliseler duvar resimlerinde ticari ve ticari-olmayan enjeksiyon harçlarının performans problemleri üzerine analitik bir değerlendirme. *Art-Sanat Dergisi* 153–179, 2017.
- [16] L. Karataş, A. Alptekin, M. Yakar, Material analysis for restoration application: A case study of the World's First University Mor Yakup Church in Nusaybin, Mardin. *Heritage Science* 11, 1–17, 2023. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00935-2>
- [17] D. French, Roman Roads and Milestones of Asia Minor = Küçük Asya'daki Roma Yolları ve Miltaşları. BAR Publishing, Ankara, 1981.
- [18] D. Magie, Roman Rule in Asia Minor, Volume 2 (Notes) : To the End of the Third Century After Christ. Princeton University Press, New Jersey, 2017.
- [19] D. Berges, Tyana in Kappadokien: Von Der Hethitischen Residenz Zur Gräco-Römischen Colonia. Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG), Darmstadt, 2002.
- [20] J.A. Cramer, A Geographical and Historical Description of Asia Minor, Oxford University Press, Oxford, 1832.
- [21] R. Dussaud, Louis Robert- Hellenica, Recueil d'épigraphie, de Numismatique et d'antiquités Grecques. Syria. Archéologie, Art et histoire, 1955.
- [22] D. Berges, J. Nollé, Tyana : Archäologisch-Historische Untersuchungen Zum Südwestlichen Kappadokien. Habelt, Bonn, 2000.
- [23] T. Gürkan, O. Doğanay, Tyana Roma Hamamı kazılarında ortaya çıkan sütun başlık parçaları.

- Karadeniz Uluslararası Bilimsel Dergi 1, 327–353, 2020. <https://doi.org/10.17498/kdeniz.833275>.
- [24] T. Gürkan, Tyana Antik Kenti Roma Hamamı kazılarında bulunmuş taş malzemeler. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya, 2021.
- [25] İ. Ketin, Anadolu'nun tektonik birlikleri. Maden Tetkik ve Arama Dergisi 66, 20–37, 1966.
- [26] M.C. Göncüoğlu, Niğde Masifinin Jeolojisi. İç Anadolu'nun Jeolojisi Sempozyumu, Türkiye Jeoloji Kurultayı, sayfa 16–19, Ankara, Türkiye, 1981.
- [27] İ. Seymen, Kaman (Kırşehir) Dolayında Kırşehir Masifinin Metamorfizması. 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 12-15, Ankara, 1981.
- [28] M.C. Göncüoğlu, Geochronological Data from the Southern Part (Niğde Area) of the Central Anatolian Massif. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 105–106, 1986.
- [29] MTA 1/100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası Serisi, 2005.
- [30] M. Korkanç, Characterization of Building Stones from the Ancient Tyana Aqueducts, Central Anatolia, Turkey: Implications on the Factors of Deterioration Processes. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 77, 237–252, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0930-2>
- [31] M. Korkanç, A. Savran, Impact of the surface roughness of stones used in historical buildings on biodeterioration. Construction and Building Materials 80, 279–294, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.073>.
- [32] TS 1900-1, İnşaat Mühendisliği Zemin Laboratuvar Deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [33] J.M. Teutonico, A Laboratory Manual for Architectural Conservators (Vol. 168), Rome, 1988.
- [34] Güleç, T. Tulun, Physico-Chemical and petrographical studies of old mortars and plasters of Anatolia. Cement and Concrete Research 27, 227–234, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00005-7).
- [35] G. Aslan, Mozaikli villa (Tripolis-Denizli) mekân duvarlarında kullanılan harçların arkeometrik yöntemlerle incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale üniversitesi, Arkeoloji Enstitüsü, 2019.
- [36] ASTM, American Society for Testing and Materials Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>.
- [37] N. Alkan, E. Çağırın Ö.H. Ersan, M. Eruş, Restorasyon ve Konservasyon Laboratuvarları Müdürlüğü; İstanbul Büyükşehir Belediyesi İmar ve Şehircilik Daire Başkanlığı Koruma Uygulama ve Denetim Müdürlüğü (KUDEB) Restorasyon ve Konservasyon Laboratuvarları Yayınları, 2009.
- [38] EN ISO 10523. Water Quality-Determination of pH, 2012.
- [39] ISO 7888 Determination of Electrical Conductivity, 1985.
- [40] C.A. Black, Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling.in: C.A., Black (Eds), Agronomy, American Society of Agronomy, Wisconsin, USA, 1965.
- [41] F. Feigl, Spot Tests in Organic Analysis. Elsevier Publishing Company, London, 1966.
- [42] P.F. Kerr, Optical Mineralogy. McGraw-Hill Higher Education, USA, 1978.
- [43] G.R. Rapp, Properties of Minerals. in: G.R. Rapp (Eds.), *Archaeomineralogy*, Springer Berlin, pp. 13-40, Heidelberg, 2002.
- [44] B. Güllü, E. Yılmaz, The Effect of Particle Size on the Major Element Oxide Analysis of Granitic Rocks with Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence (WD-XRF). 9th Geochemistry Symposium with International Participation; Aydın, Türkiye, 2022.
- [45] B. Gullu, Y.K. Kadioglu, Use of tourmaline as a potential petrogenetic indicator in the determination of host magma: CRS, XRD and PED-XRF Methods. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 183, 68–74, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.04.032>.
- [46] B. Güllü, K. Deniz, Nature and crystallization stages of spherulites within the obsidian: Acıgöl (Cappadocia-Nevşehir, Turkey). Turkish Journal of Earth Sciences 31, 545–562, 2022. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1819>.
- [47] M. Korkanç, İgnimbiritlerin jeomekanik özelliklerinin yapı taşı olarak kullanımına etkisi: Nevşehir Taşı. Jeoloji Mühendisliği Dergisi 31, 49–60, 2007.
- [48] A. Akyol, M. Yılmaz, Hasankeyf Sultan Süleyman Cami Minaresi Harç Örneklerinin Arkeometrik Analizleri. Cedrus 8, 643–658, 2020. <https://doi.org/10.13113/cedrus.202033>.
- [49] M. Eroğlu, M. Bilgen, Y. Kağan Kadioğlu, K. Deniz, Karabük Ovacık Çukur Camisi yapı malzemelerinin arkeometrik analizleri. Art-Sanat 16, 151–179, 2021. <https://doi.org/10.26650/artsanat.2021.16.0006>.
- [50] C. Oğuz, F. Türker, N.U. Koçkal, Andriake Limanında Roma, Bizans ve Selçuklu Dönemi Harçların Özellikleri. Teknik Dergi 26, 429, 2015.
- [51] D. Ergenç, A. Türer, P. Degryse, E. Torun, J. Poblome, Ç. Meral Akgül, Multiscale assessment of masonry materials from the Roman Imperial Baths at Sagalassos. Measurement 198, 111368, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111368>.
- [52] N. Aysal, Ş. Caran, Sagalassos Antik Kenti (Pisidia) yapı ve dekor taşlarının mineralojisi, petrografisi ve kaynak alanlar. İstanbul Yerbilimleri Dergisi 29, 2019.





Kentsel atıksuda ve atıksu arıtma tesisinde bazı analjezik ve anti-enflamatuar farmasötiklerinin varlığı, giderimleri ve çevresel risk değerlendirilmesi

Presence, removal and environmental risk assessment of some analgesic and anti-inflammatory pharmaceuticals in urban wastewater and wastewater treatment plant

Arzu Ulvi^{1,*}, Senar Aydın², Mehmet Emin Aydın³

^{1,2} Necmettin Erbakan Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya Türkiye

Öz

Farmasötiklerin sucul çevrelere ulaşmasındaki önemli kaynaklardan bir tanesi atıksu arıtma tesisi deşarjlarıdır. Bu çalışmada, Konya kenti kanalizasyon sisteminde bazı analjezik ve anti-enflamatuarların varlığı ve konsantrasyonu, Konya Atıksu Arıtma Tesisinin (AAT)'de bu farmasötiklerin giderimi belirlenmiştir. AAT deşarjı ile alıcı ortama deşarj edilen farmasötiklerin oluşturduğu ekotoksikolojik risk balık, *Daphnia magna* ve alg için değerlendirilmiştir. Kanalizasyon sisteminin 22 farklı noktasından ve ATT giriş-çıkışından alınan örneklerin ekstraksiyonu katı faz ekstraksiyonu ile, farmasötiklerin kalitatif ve kantitatif analizleri ise sıvı kromatografisi kütle spektrometresi (LC-MS/MS) ile gerçekleştirilmiştir. Kanalizasyon sisteminde etodolac 3875 ng/L, diclofenac 119 ng/L, flurbiprofen 247912 ng/L, naproxen 1827 ng/L, paracetamol 7204 ng/L, propyphenazone 2.23 ng/L ortalama konsantrasyonlarında tespit edilmiştir. AAT giriş ve çıkışında ise sırasıyla etodolac 5080 ng/L ve 19688 ng/L, diclofenac 248 ng/L ve 962 ng/L, naproxen 1924 ng/L ve 97.7 ng/L, paracetamol 3286 ng/L ve 109 ng/L, propyphenazone 7.3 ng/L ve 20.9 ng/L ortalama konsantrasyonlarında tespit edilmiştir. AAT'de naproxen, paracetamol farmasötikleri için %90 üzerinde giderim gözlenmiş, diğer farmasötiklerin tesiste giderilemediği görülmüştür. Çıkış atıksuyunda tespit edilen konsantrasyonlar ile yapılan risk değerlendirmesinde risk oranı (RQ) değerleri 4.3×10^{-5} - 2.6×10^{-2} aralığında tespit edilmiştir ve alıcı ortam için önemsiz risk oluşturduğu belirlenmiştir. Buna rağmen, farmasötiklerin alıcı ortamlarda bulunan tek kirletici olmadığı, konvansiyonel ve diğer mikrokirleticilerle bir arada bulunduğu, hepsinin ayrı ayrı toksik etkileri birleştiğinde ciddi çevresel sorunlar oluşturabileceği unutulmamalıdır. Ayrıca, farmasötikler çevresel ortamlarda ve canlı dokularda birikebilir, besin zincirine taşınabilir.

Anahtar kelimeler: Farmasötik, Analjezik, Anti-enflamatuar, Atıksu, Giderim.

Abstract

One of the important sources for pharmaceuticals to reach aquatic environments is wastewater treatment plant discharges. In this study, the presence and concentration of some analgesic and anti-inflammatory in the sewage system and the removal of these pharmaceuticals in Konya Wastewater Treatment Plant (WWTP) were determined. Ecological risk posed by pharmaceuticals discharged to the receiving environment with WWTP discharge has been evaluated for fish, *Daphnia magna* and algae. Extraction of samples taken from 22 different points of the sewage system and WWTP influent and effluent was carried out with a solid phase extraction system. Qualitative and quantitative analyzes of pharmaceuticals were performed by liquid chromatography mass spectrometry (LC-MS/MS). Mean concentrations of etodolac 3875 ng/L, diclofenac 119 ng/L, flurbiprofen 247912 ng/L, naproxen 1827 ng/L, paracetamol 7204 ng/L, propyphenazone 2.23 ng/L were detected in the sewage system. Mean concentrations were detected for etodolac 5080 ng/L, 19688 ng/L, for diclofenac 248 ng/L, 962 ng/L, for naproxen 1924 ng/L, 97 ng/L, for paracetamol 3286 ng/L, 109 ng/L, for propyphenazone 7.30 ng/L, 20.9 ng/L at the influent and effluent of the WWTP, respectively. Over 90% removal was observed for naproxen and paracetamol in the WWTP, and it was observed that other pharmaceuticals could not be removed in the plant. In the risk assessment made with the concentrations detected in the effluent, the RQ values were determined in the range of 4.3×10^{-5} - 2.6×10^{-2} and it poses an insignificant risk for the receiving environment. However, it should be kept in mind that pharmaceuticals are not the only pollutants found in receiving environments, they coexist with conventional and other micropollutants, and when their toxic effects are combined, they can create serious environmental problems. In addition, pharmaceuticals can accumulate in environment and living tissues, enter the food chain.

Keywords: Pharmaceutical, Analgesic, Anti-inflammatory, Wastewater, Removal.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: atekinay@erbakan.edu.tr (A. Ulvi)

Geliş / Received: 03.04.2023 Kabul / Accepted: 19.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1276286

1 Giriş

Farmasötikler, insan sağlığını geliştirmek, hastalıkları tedavi etmek, hayvancılıkta verimliliği artırmak için tıp ve veterinerlik alanlarında kullanılan farklı biçim, amaç ve etkinliklere sahip geniş bir bileşik grubunu içerir. Analjezikler, anti-enflamatuarlar, antibiyotikler, kolesterol düzenleyiciler, beta-blokerler gibi farmasötik bileşikler dünya çapında rutin yaşamın bir parçası haline gelmiştir ve tüketim oranları gittikçe artmaktadır [1, 2, 3]. Analjezik ve anti-enflamatuar grubu farmasötikler en sık tüketilen bileşikler olup ateş, ağrı, iltihaplanma tedavisinde ve kombinasyon ilaçlarda kullanılan farmasötiklerdir [4, 5]. Farmasötikler yüzeysel suyu, yeraltı suyu, atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkış suyu, arıtma çamuru gibi neredeyse bütün çevresel matrislerde tespit edilmişlerdir. Farmasötikler insan ve hayvanlar tarafından kullanıldıktan sonra ana bileşik veya metabolitleri şeklinde vücuttan idrar ve dışkı yoluyla atılırlar. Vücuttan atılan farmasötikler çoğunlukla kanalizasyon sistemi ile atıksu arıtma tesislerine (AAT) ulaşmaktadırlar. Evsel atıksular, hastane atıksuları, endüstriyel atıksular, katı atık deponi sahaları çevresel ortamlarda tespit edilen farmasötiklerin temel kaynaklarıdır [6]. Su ortamında farmasötiklerin varlığı mevsim, tüketim alışkanlıkları, seyreltme etkisi, sıcaklık gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Analjezik ve anti-enflamatuarlar yaz ve sonbahar döneminde atıksuda daha yüksek konsantrasyonlarda tespit edilmiştir [7]. Moreno-Gonzalez ve diğ., [8] anti-enflamatuarları sonbahar döneminde yüksek konsantrasyonlarda tespit etmişlerdir. Aydın ve diğ. [9] analjezik ve anti-enflamatuar grubu farmasötikleri genel hastane atıksularında yaz mevsiminde, çocuk hastanesi atıksularında kış mevsiminde yüksek konsantrasyonlarda tespit etmişlerdir. Yağışlı mevsimlerde artan seyrelme oranları, farmasötiklerin o dönemlerdeki yüksek tüketimlerine rağmen atıksularda düşük konsantrasyonlarda tespit edilmelerine sebep olabilir. Sıcaklıkta farmasötiklerin sorpsiyon ve bozunmalarını etkileyen faktörlerdendir [7].

Yapılan bazı çalışmalarda analjezik ve anti-enflamatuar bileşiklerinden parasetamol yüzeysel sulara 18-42000 ng/L [10, 11, 12], ham atıksuda 1350-700000 ng/L [11, 7, 13], propyphenazone yüzeysel sulara 12.5-568 ng/L [14, 15], ham atıksuda 6.4-500 ng/L [16, 17], yeraltı suyunda 92 ng/L [18], diclofenac yüzeysel sulara 41.3-11.52 ng/L [19, 15], ham atıksuda 31-1093 ng/L [11, 16], etodolac yüzeysel suda 0.3 ng/L [20] konsantrasyonlarında tespit edilmiştir. Genel olarak, konvansiyonel AAT'ler karbon, fosfor, azot ve patojenler gibi kirleticileri gidermek için dizayn edilmişlerdir [21]. Farmasötiklerin yüksek polarite, uçuculuk, yüksek lipofiliklik, kalıcılık ve adsorpsiyon gibi fiziko-kimyasal özellikleri, AAT'lerdeki giderim oranlarını etkileyebilir [22, 23]. Konvansiyonel AAT'ler farmasötik bileşiklerin giderimleri için yeterli olmayabilir. AAT'lerde farmasötiklerin giderimi akuatik çevre üzerindeki negatif etkilerinin önlenmesi için çok önemlidir [2].

Farmasötiklerin su ortamında ng/L-µg/L konsantrasyon seviyelerinde bile toksik etki gösterebileceği belirtilmiştir [24, 25]. Farmasötikler spesifik bir organizmada biyolojik bir tepki üretmesi amacıyla tasarlanırlar. Bu nedenle çevresel

konsantrasyonlara maruz kalma, spesifik olmayan organizmalarda beklenmedik biyolojik tepkilere yol açabilir, düşük konsantrasyonlarda bulduklarında akut etkiden ziyade kronik etki göstermeleri beklenir [26]. Farmasötiklerin çevrede bulunması flora, fauna ve insanlar üzerindeki biyolojik potansiyelleri ile ilgili olarak çeşitli sorunlara yol açabilir. Farmasötik kalıntılarının su ortamındaki uzun vadeli etkisi ve davranışı hakkında çok az şey bilinmektedir. Ayrıca farmasötik bileşiklerinin bir arada bulunmalarının toksik sinerjik etki gösterip göstermediği de önemli bir konudur [14]. Farmasötiklerin toksik etkilerini belirleyebilmek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, gökkuşağı alabalığında 5 µg/L konsantrasyonunda diclofenac maruziyeti, solungaç değişikliklerine ve böbrek lezyonlarına neden olmuştur [27]. Antibiyotikler için, yaygın olarak bildirilen toksik etkiler ise siyanobakteriler ve yeşil alglerde büyüme inhibisyonu [28] ve antibiyotik direncinin gelişimi olarak bildirilmiştir.

Bu çalışmada Konya kanalizasyon sisteminin farklı noktalarından ve kentsel AAT'nin giriş ve çıkışından atıksu örnekleri alınmıştır. Numunelerde parasetamol, propyphenazone, etodolac, diclofenac, flurbiprofen, naproxen bileşikler araştırılmıştır. Bileşiklerin atıksuda varlığı ve AAT'de giderimleri incelenmiştir. Çıkış atıksuyunda tespit edilen farmasötik bileşiklerinin alıcı ortam için ekotoksikolojik riski balık, *Daphnia magna* ve alg test organizmaları için değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Araştırılan bileşikler ve kullanılan kimyasallar

Çalışmada incelenen analjezik ve anti-enflamatuar farmasötiklerinin tümü Fluka'dan temin edilmiştir. Çalışmada incelenen farmasötik bileşikler ve fizikokimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Ekstraksiyon ve kromatografik analiz aşamasında kullanılan metanol, asetonitril, %37'lik hidroklorik asit, %98'lik formik asit, Na₂EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt solution) Merck'den temin edilmiştir. Numune hazırlama aşamalarında kullanılan glass fiber filtre (1.2 µm) Whatman'dan, nylon membran filtre (0.45 µm) Sartorius'dan, Oasis HLB (Hydrophilic Lypophilic) kartuşu (60 mg, 3 mL) Waters Corporation'dan temin edilmiştir.

2.2 Atıksu örnekleri

Konya ili kanalizasyon sistemi atıksuları ve yağmur sularını birlikte taşıyan birleşik kanal sistemine sahiptir. Konya AAT giriş yapısı, pompa istasyonu, kaba ve ince ızgara, havalandırılmalı kum ve yağ tutucular, ön çökeltme tankları, havalandırma tankları, son çökeltme tankları, çamur ön yoğunlaştırıcılar, anaerobik çürütücüler, çamur son yoğunlaştırıcılar, stabilize çamurun mekanik susuzlaştırılması, ultraviyole ile dezenfeksiyon sistemi ünitelerinden oluşmaktadır. Atıksu örnekleri şehrin tamamını temsil edecek şekilde belirlenen Konya ili kanalizasyon sisteminin 22 farklı noktasında alınmıştır.

Tablo 1. Analjezik ve anti-enflamatuarların fizikokimyasal özellikleri [29, 30]

Farmasötikler	Molekül formülü	Molekül kütle(g/mol)	pKa	Çözünürlük (mg/L; 25 °C)	Log Kow
Etodolac	C ₁₇ H ₂₁ NO ₃	287.35	4.65	16	2.5
Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ NO ₂	296.1	3.99	2.37	4.51
Flurbiprofen	C ₁₅ H ₁₃ FO ₂	244.26	4.03	8	4.16
Naproxen	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	230.26	4.18	15.9	3.18
Paracetamol	C ₈ H ₉ NO ₂	151.16	9.38	14000	0.46
Propyphenazone	C ₁₄ H ₁₈ N ₂ O	230.31	0.47	9260	2.35

Ayrıca Konya AAT giriş ve çıkışından numune alınmıştır. AAT'den alınan numuneler 24 saatlik kompozit numune, kanalizasyon sisteminden alınan numuneler 2 saatlik kompozit numune şeklinde alınmıştır.

2.3 Ekstraksiyon çalışmaları

Atıksu örneklerinin ekstraksiyon çalışmaları Aydın ve diğ., [9] referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ekstraksiyonu katı faz ekstraksiyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. 200 mL atıksu numunesi 1.2 µm gözenek çapına sahip cam fiber filtreden ve arkasından 0.45 µm gözenek çapına sahip nylon membran filtreden süzümüştür. Atıksuların içerisine nihai konsantrasyonu %0.1 (g solute/g solution, m/v) olacak şekilde 0.1 M Na₂EDTA çözeltisi eklenmiştir. J.T. Baker marka katı faz ekstraksiyon Oasis HLB kartuş kullanılmıştır. Kartuş öncelikle 5 mL metanol, 5 mL deiyonize su ile şartlandırılmış daha sonra numuneler yaklaşık 1 mL/dk akış hızında kartuşa yüklenmiştir. Kartuş 5 mL saf su ile yaklaşık 2 mL/dk akış hızında yıkanmış ve kartuş içerisindeki fazla suyun uzaklaştırılması için 5 dakika süresince kartuştan hava geçirilmiştir. Kartuş içerisindeki bileşiklerin elüsyonu 4x2.5 mL metanol ile yaklaşık 1 mL/dk akış hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen elüsyon son hacmi 200 µL'ye evaporatör ve azot gazı kullanılarak konsantre edilmiştir.

2.4 LC-MS/MS analizleri

Analjezik ve anti-enflamatuarların kantitatif analizleri Agilent marka sıvı kromatografi kütle spektrometre dedektör (liquid chromatography/tandem-mass spectrometry, LC/MS/MS) sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Agilent Poroshell 120 EC-C18 (3.0x100 mm, 2.7 µm) kolon kullanılmıştır. %0.1 formik asit ve 2 mM amonyum format içeren su ve metanol mobil faz olarak kullanılmıştır. Analjezik ve anti-enflamatuarlar için LC-MS/MS sistemi ile elde edilen LOD (dedeksiyon limiti) değerleri 0.0099-0.3943 ng/L, LOQ (kantifikasyon limiti) değerleri 0.0331-1.3146 ng/L, R² değerleri ise çalışılan bileşikler için 0.9818-0.9963 aralığında elde edilmiştir.

2.5 Çevresel risk değerlendirmesi

İnsanlar, hayvanlar, bitkiler ve bakterilerin farmasötiklere eser miktarda uzun süreli maruz kalması, kronik hastalıklara ve endokrin bozucu etkilere neden olabilir [31]. Konya AAT çıkış atıksuları ana tahliye kanalı vasıtasıyla Tuz Gölü'ne deşarj edilmektedir [9]. Çıkış

atıksuyunda tespit edilen konsantrasyonlar için risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Ekotoksikolojik riski belirlemek için RQ (Risk Quotients) değerleri hesaplanmıştır. RQ değerleri; ölçülen konsantrasyonların (MEC, measured environmental concentration), hiçbir etki göstermediği tahmin edilen çevresel konsantrasyonlara (PNEC, predicted non-effect environmental concentration) bölünmesiyle hesaplanmaktadır [9]. RQ değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formül Denklem (1)'de verilmiştir.

$$RQ = MEC/PNEC \quad (1)$$

Çalışmada incelenen bileşiklerin MEC ve PNEC değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Araştırılan farmasötiklerin MEC ve PNEC değerleri

Farmasötik	MEC (ng/L)	PNEC (µg/L)*		
		Balık	<i>Daphnia magna</i>	Alg
Etodolac	19688.3	-	-	-
Diclofenac	962.8	532	5057	2911
Naproxen	97.7	34	15	22
Paracetamol	109.7	40	41	2549
Propyphenazone	20.9	0.80	3.5	1
Toplam RQ				

*: PNEC değerleri Sanderson ve diğ. [32] alınmıştır.

-: veri bulunamadı.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Kanalizasyon sisteminde analjezikler ve anti-enflamatuarların varlığı

Tablo 3'te kanalizasyon sisteminden alınan numunelerde tespit edilen analjezik ve anti-enflamatuar bileşiklerinin konsantrasyonları verilmiştir. Flurbiprofen bileşiği 9 numunede analiz edilmiş ve en yüksek konsantrasyonlarda (484266 ng/L) tespit edilen farmasötik olmuştur. Paracetamol bütün numunelerde tespit edilmiştir ve flurbiprofenden sonra en yüksek konsantrasyonlarda tespit edilen farmasötik olmuştur. Etodolac bir numune hariç diğer numunelerde tespit edilmiştir. Diclofenac ve naproxen farmasötikleri bütün numunelerde tespit edilmiştir. Propyphenazone sadece 8 numunede tespit edilmiştir. Propyphenazone en düşük konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Numunelerin hepsinde araştırılan farmasötik

bileşiklerinin en az 4 tanesi tespit edilmiştir. Konya kanalizasyon sisteminde ortalama konsantrasyonlar etodolac için 3875 ng/L, diclofenac için 119 ng/L, flurbiprofen için 247912 ng/L, naproxen için 1827 ng/L, paracetamol için 7204 ng/L, propyphenazone için 2.23 ng/L tespit edilmiştir. Konya da bulunan sağlık kuruluşları, hastaneler, veteriner klinikleri atıksularını herhangi bir arıtıma tabi tutmadan kanalizasyon sistemine deşarj etmektedirler. Sonbahar, kış mevsimlerinde enfeksiyon hastalıklarının artması, son yıllarda ortaya çıkan covid-19 salgını analjezik ve anti-enflamatuarların tüketimini arttırmıştır. Yüksek konsantrasyonlarda tespit edilen flurbiprofen güçlü bir anti-enflamatuar ilaçtır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Aydın ve diğ., [9] Konya'da hastane atıksularında ve AAT giriş ve çıkışından aldıkları numunelerde bazı analjezik ve anti-enflamatuarları araştırmışlardır. Diclofenac, naproxen, paracetamol bileşiklerinin sırasıyla hastane atıksularında 1.42-2221 ng/L, 83.9-43360 ng/L, 396-206927 ng/L; AAT girişinde 27.1-473 ng/L, 42.7-302 ng/L; AAT çıkışında 3.04-411 ng/L, 42.7-302 ng/L, 21.4-436 ng/L olarak tespit etmişlerdir. Aydın ve diğ., [9] kanalizasyon sisteminde

alınan numuneleri hastane çıkışlarından alındıkları için bu çalışmadan daha yüksek sonuçlar elde etmişlerdir. AAT giriş ve çıkışından alınan numuneler de tespit edilen konsantrasyonlar ise bu çalışma ile benzerlik göstermektedir. Zorita ve diğ., [33] evsel atıksuda, hastane atıksuyunda ve AAT'nin farklı ünitelerinden alınan atıksularda naproxen ve diclofenac bileşiklerini araştırmışlardır. Naproxen evsel atıksu, hastane atıksuyu ve AAT'de sırası ile 20200 ng/L, 9300 ng/L, 290-4900 ng/L konsantrasyonlarında, diclofenac evsel atıksu, hastane atıksuyu ve AAT'de sırası ile 700 ng/L, 380 ng/L, 100-490 ng/L konsantrasyonlarında tespit edilmiştir. Zorita ve diğ., [33] kanalizasyon sisteminden alınan evsel ve hastane atıksularında tespit ettikleri konsantrasyonlar bu çalışmada tespit edilen konsantrasyonlardan yüksektir. Tesiste tespit edilen konsantrasyonlar ise benzerlik göstermektedir. Migowska ve diğ., [34] AAT giriş ve çıkışından alınan atıksu numunelerinde paracetamol <MDL (metot dedeksiyon limiti), flurbiprofen <MDL, naproxen sırası ile 240 ng/L, 70 ng/L, diclofenac sırası ile 460 ng/L, 120 ng/L olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3. Konya kenti kanalizasyon sisteminde tespit edilen konsantrasyonlar (ng/L)

Numune no	Etodolac	Diclofenac	Flurbiprofen	Naproxen	Paracetamol	Propyphenazone
1	10527	240	351695	3991	9213	<dl
2	1127	132	26272	1718	3528	<dl
3	2604	142	226047	866	9621	<dl
4	4139	79.7	302610	2645	5634	<dl
5	2449	127	428353	1375	6716	<dl
6	19317	61.6	211919	1451	4777	<dl
7	<dl	2.91	106222	582	9354	<dl
8	202	60.5	93825	479	1825	<dl
9	980	55.6	484267	1332	3716	<dl
10	32.6	42.6	ae	212	1425	<dl
11	75.5	13.8	ae	463	5738	<dl
12	1375	88.8	ae	1318	3071	<dl
13	9669	293	ae	4130	5841	3.69
14	5809	132	ae	1786	8943	3.71
15	10392	262	ae	4404	14458	4.43
16	273	80.9	ae	2036	7022	<dl
17	9393	188	ae	1303	13077	1.64
18	85.7	47.3	ae	229	17504	2.18
19	236	57.4	ae	914	2538	2.14
20	247	76.7	ae	3575	7921	<dl
21	4032	136.7	ae	690	6646	3.39
22	2297	301.8	ae	4714	9936	27.9
Ortalama	3875	119	247912	1827	7204	2.23

<dl: dedeksiyon limitinin altında ae: analiz edilmedi

3.2 Kentsel atıksu arıtma tesisinde analjezikler ve anti-enflamatuarların tespiti ve giderimleri

Birçok ülkede farmasötiklerin alıcı ortama deşarjı için yasal bir düzenleme bulunmamaktadır. Konvansiyonel arıtma tesisleri farmasötiklerin başlangıçtaki konsantrasyonlarına da bağı olarak genelde farmasötikler için yetersiz arıtım sağlar [35]. Biyolojik arıtma ucuzdur ve organik madde giderimi için yüksek etkinlik gösterir, ancak farmasötikler gibi dirençli kirleticilerde yüksek giderim oranları sağlanamayabilir [36]. Tablo 4'te araştırılan farmasötik bileşiklerinin Konya kentsel AAT giriş ve çıkış atıksuyundaki konsantrasyonları ve giderim oranları verilmiştir. Etodolac, diclofenac ve propyphenazone farmasötikleri çıkış atıksuyunda giriş atıksuyundan daha yüksek konsantrasyonlarda tespit edilmiştir ve giderim gözlenmemiştir. Farmasötiklerin AAT'lerdeki akıbetini araştıran farklı çalışmalarda benzer durum gözlenmiştir. Cezayir'de mekanik ve biyolojik arıtma uygulanan tesiste diclofenac girişte 990 ng/L, çıkışta 2710 ng/L konsantrasyonunda tespit edilmiştir [37]. AAT'lerde atıksuda bulunan konjuge farmasötik bileşiklerini biyolojik süreçler nedeniyle ana forma dönüşebilir. Ayrıca aktif çamur ve katı maddelere adsorplanan farmasötikler de salınabilir [38]. Tablo 4 incelendiğinde bu çalışmada naproxen ve paracetamol bileşiklerinin sırası ile %94 ve %96 oranlarında giderildiği görülmektedir.

Tablo 4. Analjezik ve anti-enflamatuarların Konya AAT'de tespit edilen konsantrasyonları ve giderimleri

Farmasötik	Giriş (ng/L)	Çıkış (ng/L)	Giderim (%)
Etodolac	5080	19688	Giderilemedi
Diclofenac	248	962	Giderilemedi
Naproxen	1924	97.7	94.9
Paracetamol	3286	109	96.6
Propyphenazone	7.30	20.9	Giderilemedi

Hedef farmasötiklerin konsantrasyonlarının farklı çalışmalarda benzer konsantrasyonlarda olduğu görülmüştür. Kołecka ve diğ., [39] Polonya'da konvansiyonel AAT'de analjezik ve anti-enflamatuarların varlığını incelemişlerdir. AAT giriş atıksuyunda ibuprofen 26366 ng/L, paracetamol 9822 ng/L, flurbiprofen <dl, naproxen 11307 ng/L, diclofenac 3139 ng/L konsantrasyonlarında, çıkış atıksuyunda ibuprofen, paracetamol, flurbiprofen <dl, naproxen 9 ng/L, diclofenac 4139 ng/L konsantrasyonlarında tespit edilmiştir. İspanya'da 1 yıllık farmasötik izleme sonrasında naproxen 2020–8500 ng/L ve 540–5090 ng/L, ibuprofen 3730–3530 ng/L ve <dl-2650 ng/L sırası ile ham atıksu da ve arıtılmış atıksu da tespit edilmiştir [40]. İrlanda'da AAT'de flurbiprofen, diclofenac, ibuprofen araştırılmış, flurbiprofen giriş ve çıkış atıksuyunda, diclofenac giriş atıksuyunda tespit edilmemiştir. Diclofenac çıkış atıksuyunda 742-2478 ng/L konsantrasyonlarında tespit edilmiştir [41].

3.3 Çevresel risk değerlendirmesi sonuçları

Tablo 5'te üç farklı trofik seviyesini temsil eden balık, *Daphnia magna* ve alg için hesaplanan RQ değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Araştırılan farmasötiklerin hesaplanan RQ değerleri

	Balık	<i>Daphnia magna</i>	Alg
Diclofenac	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$
Naproxen	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$
Paracetamol	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$
Propyphenazone	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$5.9 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$
Toplam RQ	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$

Alıcı ortamda risk değerlendirilmesinde RQ değerlerinin <0.1 olması önemsiz risk, $0.1 < RQ < 1$ olması düşük risk, $1 < RQ < 10$ olması orta risk ve $RQ > 10$ olması yüksek risk oluşturacağı anlamına gelmektedir [9]. Tablo 5 incelendiğinde RQ değerleri 0.1'den küçüktür ve önemsiz risk olarak sınıflandırılır. Farmasötiklerin sinerjik etkilerini değerlendirebilmek için toplam RQ değerleri de Tablo 5'de verilmiştir. Toplam RQ değerlerinin de 0.1'den küçük olduğu görülmektedir. Toplam RQ değerlerinde de önemsiz risk tespit edilmesine rağmen RQ değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu çalışma kapsamında sadece 4 tane farmasötik için risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Çevresel şartlarda alıcı ortamlar çok sayıda kirleticiye maruz kalabilmektedirler. Bütün kirleticilerin olumsuz etkilerinin birlikte düşünülmesi gerekmektedir. Nieto-Juarez ve diğ., [42] farklı AAT'lerinin çıkış atıksularında farmasötikler için risk değerlendirmesi yapmışlardır. Paracetamol açısından orta ve yüksek risk, diclofenac açısından düşük ve orta risk tespit etmişlerdir. Passananti ve diğ., [5] etodolac farmasötüğünün iki farklı trofik seviye üzerine (bitkiler ve omurgasızlar) ekotoksikolojik etkisini incelemişlerdir. Etodolac farmasötüğünün mg/L seviyesindeki konsantrasyonları için uzun vadeli etkileri (mutajenik ve genotoksik) olduğu bulunmuştur.

4 Sonuçlar

Analjezik ve anti-enflamatuar bileşiklerini en sık tüketilen farmasötik bileşik gruplarından bir tanesidir. Ülkemizde antibiyotikler ve psikiyatri ilaçları gibi bazı farmasötiklerin tüketimi ve satışı reçetesiz yapılamamaktadır. Ancak analjezik ve anti-enflamatuar farmasötikleri reçetesiz olarak eczanelerden satın alınabilmektedirler. Bilinçsiz tüketimleri oldukça yaygın olan analjezik ve anti-enflamatuar grubu farmasötikler ayrıca en sık reçete edilen ilaçlardır. Sonbahar ve kış mevsiminde, son üç yıldır covid-19 salgını ile bu ilaçların tüketimleri gittikçe artmıştır. Konya kenti kanalizasyon sisteminde analjezik ve anti-enflamatuar farmasötikleri atıksularda maksimum 484266 ng/L (Flurbiprofen) konsantrasyonunda tespit edilmiştir. Bu çalışmada da kanıtlandığı gibi, konvansiyonel arıtma sistemleri farmasötik bileşiklerini hepsini verimli bir şekilde arıtmıyor ve dolayısıyla alıcı ortama deşarj edilmesini

engelleyemiyor. Bu nedenle, mevcut AAT'ler ileri oksidasyon prosesleri, aktif karbon vb. ileri arıtım yöntemleri ile geliştirilmelidir. Yapılan risk değerlendirmesi sonucunda araştırılan bileşikler için önemsiz çevresel risk tespit edilmiştir. Bu çalışmada araştırılan her farmasötik tek başına oluşturduğu risk değerlendirilmiştir ancak alıcı ortam birçok kirleticiye eş zamanlı maruz kalmaktadır ve kümülatif risk daha büyüktür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 16

Kaynaklar

- [1] K. Kodom, F. Attiogbe and F.A. Kuranchie, Assessment of removal efficiency of pharmaceutical products from wastewater in sewage treatment plants: A case of the sewerage systems Ghana limited, *Accra. Heliyon*, 7, 11, 08385, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.08385>.
- [2] D.J. Son, C.S. Kim, J.W. Park, J.H. Lee, S.H. Lee, S.K. Shin and D.H. Jeong, Fate evaluation of pharmaceuticals in solid and liquid phases at biological process of full-scale municipal wastewater treatment plants. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102538, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102538>.
- [3] C.F. Couto, L.C. Lange and M.C.S. Amara, Occurrence, fate and removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) in water and wastewater treatment plants—A review. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100927, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100927>.
- [4] T. J. Scheytt, P. Mersmann and T. Heberer, Mobility of pharmaceuticals carbamazepine, diclofenac, ibuprofen, and propyphenazone in miscible-displacement experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, 83, 53 – 69, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2005.11.002>.
- [5] M. Passananti, M. Lavorgna, M. R. Iesce, M. DellaGreca, M. Brigante, E. Criscuolo, F. Cermola and M. Isidori, Photochemical fate and eco-genotoxicity assessment of the drug etodolac. *Science of The Total Environment*, 518–519, 258-265, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.009>.
- [6] L. Jiang, Y. Li, Y. Chen, B. Yao, X. Chen, Y. Yu, J. Yang and Y. Zhou, Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment: Biototoxicity, determination and electrochemical treatment. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135923, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135923>.
- [7] M. Papageorgiou, C. Kosma and D. Lambropoulou, Seasonal occurrence, removal, mass loading and environmental risk assessment of 55 pharmaceuticals and personal care products in a municipal wastewater treatment plant in Central Greece. *Science of The Total Environment*, 543, 547–569, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.047>.
- [8] R. Moreno-Gonzalez, S. Rodríguez-Mozaz, M. Gros, E. Perez-Canovas, D. Barceló and V.M. Leon, Input of pharmaceuticals through coastal surface watercourses into a Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain): sources and seasonal variations. *Science of The Total Environment*, 490, 59–72, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.097>.
- [9] S. Aydın, M.E. Aydın and A. Ulvi, Monitoring the release of anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals in the receiving environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(36):36887-36902, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06821-4>.
- [10] M. Xu, H., Huang, N. Li, F. Li, D. Wang and Q. Luo, Occurrence and ecological risk of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and pesticides in typical surface watersheds, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 175, 289–298, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.131>.
- [11] Y.Y. Yang, W.R. Liu, Y.S. Liu, J.L. Zhao, Q.Q. Zhang, M. Zhang, J.N. Zhang, Y.X. Jiang, L.J. Zhang and G.G. Ying, Suitability of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and artificial sweeteners (ASs) as wastewater indicators in the Pearl River Delta, South China. *Science of The Total Environment*, 590–591, 611–619, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.001>.
- [12] T.B. Veras, A. Luiz Ribeiro de Paiva, M.M.M.B. Duarte, D.C. Napoleão and J.J. da Silva Pereira Cabral, Analysis of the presence of anti-inflammatories drugs in surface water: A case study in Beberibe river - PE, Brazil. *Chemosphere*, 222, 961–969, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.167>.
- [13] S. Daouk, N. Chèvre, N. Vernaz, C. Widmer, Y. Daali and S. Fleury-Souverain, Dynamics of active pharmaceutical ingredients loads in a Swiss university hospital wastewaters and prediction of the related environmental risk for the aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 547, 244–253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.117>.
- [14] M. Petrović, B. Škrbić, J. Živančev, L. Ferrando-Climent and D. Barcelo, Determination of 81 pharmaceutical drugs by high performance liquid chromatography coupled to mass spectrometry with hybrid triple quadrupole-linear ion trap in different types of water in Serbia. *Science of The Total Environment*, 468–469, 415–428, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.079>.
- [15] P. Palma, S. Fialho, A. Lima, M.H. Novais, M.J. Costa, N. Montemurro, S. Pérez and M.L. de Alda, Pharmaceuticals in a Mediterranean Basin: The influence of temporal and hydrological patterns in environmental risk assessment. *Science of The Total Environment*, 709, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136205>.
- [16] M.J. Gallardo-Altamirano, P. Maza-Márquez, J.M. Peña-Herrera, B. Rodelas, F. Osorio and C. Pozo, Removal of anti-inflammatory/analgesic pharmaceuticals from urban wastewater in a pilot-scale

- A2O system: Linking performance and microbial population dynamics to operating variables. *Science of The Total Environment*, 643, 1481–1492, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.284>.
- [17] M. Petrovic, M. Gros and D. Barcelo, Multi-residue analysis of pharmaceuticals in wastewater by ultra-performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1124, 68–81, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.05.024>.
- [18] A. Jurado, E. Vazquez-Sune and E. Pujades, Urban groundwater contamination by nonsteroidal anti-inflammatory drugs. *Water*, 13, 720, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13050720>.
- [19] B.M. Sharma, J. Bečanová, M. Scheringer, A. Sharma, G.K. Bharat, P.G. Whitehead, J. Klánová and L. Nizzetto, Health and ecological risk assessment of emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, and artificial sweeteners) in surface and groundwater (drinking water) in the Ganges River Basin, India. *Science of The Total Environment*, 646, 1459–1467, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.235>.
- [20] K. Hoshina, S. Horiyama, H. Matsunaga and J. Haginaka, Simultaneous determination of non-steroidal anti-inflammatory drugs in river water samples by liquid chromatography–tandem mass spectrometry using molecularly imprinted polymers as a pretreatment column. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 55, 5, 916–922, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2011.03.014>.
- [21] A. Gogoi, P. Mazumder, V.K. Tyagi, G.G.T. Chaminda, A.K. An and M. Kumar, Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 169–180, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.009>.
- [22] O.F.S. Khasawneh and P. Palaniandy, Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants. *Process Safety and Environmental Protection*, 150, 532–556, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.045>.
- [23] A. Majumder, B. Gupta and A.K. Gupta, Pharmaceutically active compounds in aqueous environment: a status, toxicity and insights of remediation. *Environmental Research*, 176, 108542, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2019.108542>.
- [24] V. Calisto and V.I. Esteves, Psychiatric pharmaceuticals in the environment. *Chemosphere*, 77, 1257–1274, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.09.021>.
- [25] C. R.D. Santos, G.S. Arcanjo, L.V. de S. Santos, K. Koch and M.C.S. Amaral, Aquatic concentration and risk assessment of pharmaceutically active compounds in the environment. *Environmental Pollution*, 290, 118049, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118049>.
- [26] R. Hernández-Tenorio, E. González-Juárez, J.L. Guzmán-Mar, L. Hinojosa-Reyes and A. Hernández-Ramírez, Review of occurrence of pharmaceuticals worldwide for estimating concentration ranges in aquatic environments at the end of the last decade. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 8, 100172, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100172>.
- [27] J. Schwaiger, H. Ferling, U. Mallow, H. Wintermayr and R.D. Negele, Toxic effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac: Part I: histopathological alterations and bioaccumulation in rainbow trout. *Aquatic Toxicology*, 68, 2, 141–150, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.03.014>.
- [28] J.-Q. Xiong, S.-J. Kim, M. B. Kurade, S. Govindwar, R.A.I. Abou-Shanab, J.-R. Kim, H.-S. Roh, M. A. Khan and B.-H. Jeon, Combined effects of sulfamethazine and sulfamethoxazole on a freshwater microalga, *Scenedesmus obliquus*: toxicity, biodegradation, and metabolic fate. *Journal of Hazardous Materials*, 370, 138–146, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.049>.
- [29] Drugbank, <https://go.drugbank.com/>, Accessed 13 March 2023.
- [30] National Library of Medicine, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>, Accessed 13 March 2023.
- [31] B. Tiwari, B. Sellamuthu, Y. Ouarda, P. Drogui, R. D. Tyagi and G. Buelna, Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach. *Bioresource Technology*, 224, 1–12, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.042>.
- [32] H. Sanderson, D.J. Johnson, C.J. Wilson, R.A. Brain and K.R. Solomon, Probabilistic hazard assessment of environmentally occurring pharmaceuticals toxicity to fish, daphnids and algae by ECOSAR screening. *Toxicology Letters*, 144, 383/395, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(03\)00257-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(03)00257-1).
- [33] S. Zoritaa, L. Mårtensson and L. Mathiasson, Occurrence and removal of pharmaceuticals in a municipal, sewage treatment system in the south of Sweden. *Science of The Total Environment* 407, 2760–2770, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.030>.
- [34] N. Migowska, M. Caban, P. Stepnowski and J. Kumirska, Simultaneous analysis of non-steroidal anti-inflammatory drugs and estrogenic hormones in water and wastewater samples using gas chromatography–mass spectrometry and gas chromatography with electron capture detection. *Science of The Total Environment*, 441, 77–88, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.043>.
- [35] J.M. Peralta-Hernandez and E. Brillas, A critical review over the removal of paracetamol (acetaminophen) from synthetic waters and real wastewaters by direct, hybrid catalytic, and sequential ozonation processes. *Chemosphere*, 313, 137411, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137411>.
- [36] B. Maryam, V. Buscio, S. Ustun Odabasi and H. Buyukgungor, A study on behavior, interaction and rejection of Paracetamol, Diclofenac and Ibuprofen (PhACs) from wastewater by nanofiltration

- membranes. *Environmental Technology & Innovation*, 100641, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100641>.
- [37] A.E.B. Kermia, D. Fouial-Djebbar and M. Trari, Occurrence, fate and removal efficiencies of pharmaceuticals in wastewater treatment plants (WWTPs) discharging in the coastal environment of Algiers. *Comptes Rendus Chimie*, 19, 963–970, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.05.005>.
- [38] B. Blair, A. Nikolaus, C. Hedman, R. Klaper and T. Grundl, Evaluating the degradation, sorption, and negative mass balances of pharmaceuticals and personal care products during wastewater treatment. *Chemosphere*, 134, 395-401, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.078>.
- [39] K. KołECKA, M. Gajewska, P. Stepnowski and M. Caban, Spatial distribution of pharmaceuticals in conventional wastewater treatment plant with Sludge Treatment Reed Beds technology. *Science of The Total Environment*, 647, 149-157, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.439>.
- [40] J.L. Santos, I. Aparicio, M. Callejón and E. Alonso, Occurrence of pharmaceutically active compounds during 1-year period in wastewaters from four wastewater treatment plants in Seville (Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 164, 1509–1516, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.073>.
- [41] C. Lacey, G. McMahon, J. Bones, L. Barron, A. Morrissey and J.M. Tobin, An LC–MS method for the determination of pharmaceutical compounds in wastewater treatment plant influent and effluent samples. *Talanta*, 75, 1089–1097, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.01.011>.
- [42] J.I. Nieto-Juárez, R.A. Torres-Palma, A.M. Botero-Coy and F. Hernández, Pharmaceuticals and environmental risk assessment in municipal wastewater treatment plants and rivers from Peru. *Environment International*, 155, 106674, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106674>.





Box Behnken istatistiksel deney tasarımının peyniraltı sularının mikrofiltrasyon ile ön arıtımında uygulaması

Application of Box Behnken statistical experimental design to the pretreatment of cheese whey by microfiltration

Ezgi Oktav Akdemir^{1,*} 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, peynir üretimi sırasında açığa çıkan peyniraltı suyunun mikrofiltrasyon prosesiyle ön arıtımı incelenmiştir. Mikrofiltrasyon verimini arttırmak için biyolojik olarak parçalanabilen, çevre dostu bir polimer olan kitosan kullanılmıştır. Membran çalışmalarında kitosan konsantrasyonu, membran basıncı, mikrofiltrasyon süresi gibi önemli işletme parametrelerinin süzüntü akışı ve KOİ giderme verimi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla Box-Behnken istatistiksel deney tasarım yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan varyans analizi sonunda tahmini ve hesaplanmış korelasyon katsayıları sırasıyla, süzüntü akışı için 0.9981 ve 0.9805, KOİ giderme verimi için 0.9974 ve 0.9953 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan Box-Behnken istatistiksel deney tasarım metodunun, peyniraltı suyunun mikrofiltrasyonunda akı ve KOİ giderimi için istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda 22.8 l/m².sa'lık maksimum akı değerine 5 mg/l kitosan, 2 bar basınç ve 30 dakika mikrofiltrasyon süresinde ulaşılmıştır. Diğer taraftan, maksimum Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) giderme verimi (%67.5) ise 15 mg/l kitosan konsantrasyonu, 1 bar basınç, 30 dakika mikrofiltrasyon süresinde elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Peyniraltı suyu, Kitosan, Mikrofiltrasyon, Box-Behnken istatistiksel deney tasarım yöntemi

1 Giriş

Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları, doğal su ortamlarının önemli ölçüde kirlenmesine neden olan kirletici kaynakları arasında yer almaktadır [1]. Peyniraltı suyu, süt ürünleri endüstrisinde peynir yapımı sırasında oluşan, süt kazeinin çökmesi ve uzaklaştırılmasından kaynaklanan yeşil-sarımsı bir sıvıdır. Yüksek organik yükü sahiptir ve büyük hacimlerde üretilmektedir. Bu nedenle süt endüstrisi atık suyu en önemli kirletici olarak kabul edilir [2].

Peyniraltı suyunun temel fizikokimyasal özellikleri incelendiğinde, Biyolojik Oksijen İhtiyacı 27-60 g/l, Kimyasal Oksijen İhtiyacı ise 50-102 g/l aralığında değişmektedir. Askıda Katı Madde konsantrasyonları 1.3–

Abstract

In this study, pre-treatment of cheese whey effluent released during cheese production by microfiltration process was investigated. Chitosan, a biodegradable, environmentally friendly polymer, was used to increase the microfiltration efficiency. The Box-Behnken statistical experiment design method was applied to investigate the effects of important operating parameters; chitosan concentration, membrane pressure, microfiltration time on permeate flux and COD removal efficiency in membrane studies. As a result of the analysis of variance, the predicted and calculated correlation coefficients were found to be 0.9981 and 0.9805 for the permeate flux, and 0.9974 and 0.9953 for the COD removal efficiency, respectively. With the Box-Behnken statistical experiment design method used in the study, it has been proven that it gives statistically reliable results for permeate flux and COD removal in cheese whey effluent microfiltration. As a result of the studies, the maximum flux value of 22.8 l/m².h was achieved at 5 mg/l chitosan concentration, 2 bar pressure and 30 minutes microfiltration time. Maximum Chemical Oxygen Demand (COD) removal efficiency (67.5%) was obtained at 15 mg/l chitosan concentration, 1 bar pressure, 30 minutes microfiltration time.

Keywords: Cheese whey effluent, Chitosan, Microfiltration, Box-Behnken statistical experiment design method

22.0 g/l aralığındadır. Ayrıca, düşük pH değerlerine sahiptir [3].

Peyniraltı suyu üretimi en sık karşılaşılan endüstriyel faaliyetlerden biridir. Yüksek kirletici içeriğine sahip olduğu için önemli çevre sorunlarından biri sayılmaktadır. Peyniraltı suyu yeniden değerlendirilmek istenirse, ultrafiltrasyon prosesiyle protein ve laktoz kazanımı sağlanabilir, sprey kurutma ile tozlaştırılarak kullanılabilir. Direkt olarak hayvan besisi maddesi olarak kullanılması da mümkündür [4]. Ancak, peynir üretimi genellikle orta ve küçük ölçekli yerel tesislerde yapılmaktadır. Yerel üreticilerin ekonomik ve sağlık sebeplerinden dolayı peynir üretimi yapılan tesislerde peyniraltı suyunun değerlendirilmesi çok da mümkün olmamaktadır [5]. Bu nedenle peyniraltı suyu, arıtılması gereken bir atıksu çeşidi olarak ortaya çıkmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ezgi.oktav@deu.edu.tr (E. Oktav Akdemir)
Geliş / Received: 06.04.2023 Kabul / Accepted: 01.09.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1278364

Süt endüstrisi atıksularını arıtmak için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Peyniraltı suyu gibi tesis içi süt ürünleri atıksu arıtımında mekanik ve fizikokimyasal yöntemler (koagülasyon/flokülasyon, adsorpsiyon, ters ozmoz, membran filtrasyonu), biyolojik yöntemler (aerobik ve anaerobik) kullanılmaktadır. Bunların arasında koagülasyon/flokülasyon, süt ürünleri atıksularındaki çözülmüş organik bileşiklerin giderilmesi için yaygın olarak kullanılan arıtma teknolojisidir [6].

Membran prosesleri, su arıtımı ve endüstriyel atıksu arıtımı için diğer uygulamalar içinde en etkili tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir. Yüksek verimlilik ve üretim kolaylığı gibi nedenler bu teknolojiyi su arıtmanın önemli bir bileşeni haline getirmiştir. Ayrıca bu teknoloji, gıda, süt ürünleri ve ilaç endüstrilerinde laktoz ve protein gibi önemli maddelerin geri kazanılması için uygulanabilir. Membran prosesler yüksek oranda tehlikeli maddeyi sudan uzaklaştırarak çevre kirliliği sorunlarını da çözebilir [7].

Peyniraltı suyunun membran prosesleri ile arıtılması amaçlanıyorsa en büyük sorun, membranın geçirgenlik etkinliğini büyük ölçüde azaltan ve aynı zamanda seçiciliğini değiştiren membran kirlenmesidir. Kirlenmeyi kontrol etmek, membranların üretkenliğini ve ömrünü iyileştirmek için membran uygulamasından önce kimyasal arıtım uygulanabilmektedir [8]. Demir klorür ve alüminyum gibi geleneksel kimyasallar, arıtım sonrasında oluşan çamurda yüksek oranda metal içeriğine neden olur [9]. Bu nedenle daha çevreci koagülantların kullanımı ön plana çıkmıştır. Karboksil Metil Selüloz (CMC) bu koagülantlardan biridir. pH=4 gibi asidik pH'larda çalışmaktadır. Süt endüstrisi atıksularının arıtılması için H₂SO₄ ile yaygın olarak kullanılır [10]. Bazı araştırmacılar, peyniraltı suyunun ön arıtımı olarak CMC ile koagülasyona alternatif olarak biyolojik katyonik bir polimer olan kitosanın kullanılabilirliğini araştırmışlardır [11]. Bir çalışmada farklı pH değerlerinde (4.5-5.25) süt endüstrisi atık sularının koagülasyon yoluyla arıtılması için kitosan kullanılmış, pH=5.25'te %60 fosfat, %60 Kimyasal Oksijen İhtiyacı ve %90 Askıda Katı Madde giderme verimi elde edilmiştir [12]. Kitosan, 5.25'e kadar yüksek pH aralıklarında bile verimli bir şekilde işlev görebilirken, CMC gibi diğer kimyasal polimerler yalnızca 4.5'in altındaki pH'larda verimli olmaktadır. Kitosan kullanımında pH ayarlaması için başka bir kimyasal kullanımına gerek kalmamaktadır. Ayrıca oluşacak çamurdan protein geri kazanımı da amaçlanıyorsa kitosan bu amaçla kullanıma uygundur [13]. Bir çalışmada süt ürünleri atıksuyunda kitosan koagülasyonu sonrası çözülmüş hava flotasyonunu uygulanmış bulanıklık, KOİ ve UV₂₅₄'ün giderilmesini sağlamıştır. Kirleticilerin giderimi için pH 5'de 73.34 mg/l'lik bir kitosan dozunun optimum olduğu bulunmuştur. Bu koşullarda KOİ, bulanıklık ve UV₂₅₄ giderimleri sırasıyla %77.5, %97.6 ve %88.8 olmuştur [14].

Süt endüstrisinden kaynaklanan atıksuların arıtımının incelendiği bir çalışmada, demir klorür ile koagülasyon ve sonrasında membran ayırma prosesleri uygulanmıştır. 0.7 g/l dozunda demir klorür ilavesi ile yapılan koagülasyonda %40.8 KOİ giderme verimi elde edilmiştir. Koagülasyon sonrasında uygulanan mikrofiltrasyon işlemi

ile verim %47.5'e yükselmiştir [15]. Bir başka çalışmada ise peyniraltı suyuna önce kitosan ile koagülasyon uygulanmış, koagülasyon sonrası peyniraltı suyu mikrofiltrasyon membranından geçirilmiştir. Çalışmada farklı kitosan konsantrasyonu, membran basıncı ve işletme zamanlarında deneyler yapılmıştır. 15 mg/l kitosan konsantrasyonu ve 1 bar basınçta %68.1 KOİ giderme verimi elde edilmiştir [16].

Bu çalışmanın temel amacı, peyniraltı suyunun mikrofiltrasyon işlemi ile ön arıtımıdır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak koagülasyon işlemi mikrofiltrasyon öncesinde ayrı olarak uygulanmamış, membran besleme tankındaki ham atıksuya farklı konsantrasyonlarda kitosan eklendikten sonra mikrofiltrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu da çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında, peyniraltı suyuna eklenen kitosan konsantrasyonu, sistem basıncı ve mikrofiltrasyon süresi gibi önemli işletme parametrelerinin süzünü akışı ve KOİ giderme verimine etkilerini araştırmak ve optimizasyon yapmak için istatistiksel deney tasarımı yöntemlerinden biri olan Box-Behnken metodu kullanılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Peyniraltı suyu numunesi

Deneyler sırasında kullanılan peyniraltı suyu numunesi Ege Üniversitesi Ziraat Mühendisliği Bölümünden temin edilmiş ve karanlık ortamda 4°C'de saklanmıştır. Deneylere başlamadan önce numune buzdolabından çıkarılarak çalkalanmış ve homojen hale getirilmiştir. Ham peyniraltı suyuna ait özellikler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Peyniraltı suyu numunesinin özellikleri

Parametre	Birim	Değer
pH	-	4.7
KOİ	mg/l	63500
AKM	mg/l	2513
TOK	mg/l	22150
Yağ ve Gres	mg/l	1500

2.2 Kitosan

Kitosan, kabuklu deniz hayvanlarının kabuklarında çok miktarda bulunan kitinden elde edilen, yeryüzünde selülozdan sonra en fazla bulunan doğal bir biyopolimerdir. Toksik değildir, bu nedenle biyolojik olarak parçalanabilir. Deneysel çalışmalarda en çok tercih edilen organik polimerlerdendir [17]. Bu çalışmada, yüksek molekül ağırlığına sahip kitosan kullanılmıştır. Sigma-Aldrich firmasından 419419 ürün koduyla temin edilmiştir.

2.3 Analitik metodlar

Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Askıda Katı Madde (AKM) ve yağ-gres analizlerinde Standart Metotlardan yararlanılmıştır [18]. pH ölçümünde 890 MD pH-metre kullanılmıştır. Toplam Organik Karbon (TOK) analizi DOHRMANN DC-190 markalı TOK ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

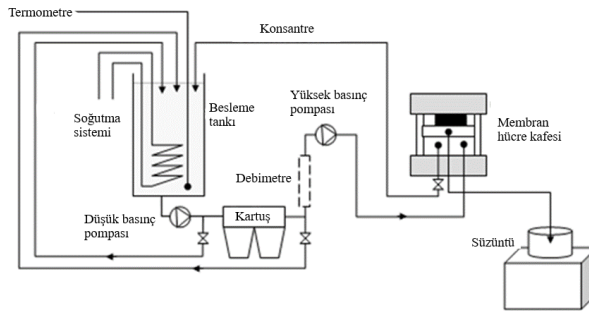
2.4 Mikrofiltrasyon membranı ve deney düzeneği

Deneyisel çalışmalarda Osmonics firmasından temin edilen JX kodlu mikrofiltrasyon membranı kullanılmıştır. Polivinilidenflorit malzemeden üretilen membran, 2-11 pH aralığına ve maksimum 3 bar basınca dayanabilmektedir. Etkili membran yüzey alanı 15.5 cm²'dir.

Mikrofiltrasyon denemeleri plaka çerçeve modüllü Osmonics Sepa CF II membran sisteminde yapılmıştır. Sistemde, düşük basınç pompası, kartuş filtre, debimetre, üç fazlı elektrik akımıyla çalışan yüksek basınç pompası, membran hücre kafesi, basınç kontrol vanası, soğutma sistemi ve 25 litrelik besleme tankı bulunmaktadır. Deneylerin başlangıcında hidrolik el pompasıyla membran hücre kafesi sıkıştırılmış, mikrofiltrasyon sırasında uygulanacak basınca dayanıklı olması sağlanmıştır. Besleme tankından alınan peyniraltı suyu, düşük basınç pompası yardımıyla kartuş filtreye gönderilmiş, burada peyniraltı suyunun içindeki kaba tanelerin tutulması sağlanmıştır. Kartuş filtreden geçen peyniraltı suyu basınçlandırılmak üzere yüksek basınç pompasına alınmış, buradan da membran hücresine gönderilmiştir. Membran hücresindeki akım, konsantre akım ve süzüntü olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Konsantre akım besleme tankına geri devrettirilmiş, süzüntü ise hassas terazi üzerindeki beherde biriktirilmiştir. Akı hesaplamaları biriktirilen süzüntü ile yapılmıştır. Sistemin soğutma tertibatı olarak spiral şekilde sarılmış ve içinden çeşme suyu geçirilmiş bakır boru kullanılmıştır. Besleme tankına yerleştirilen soğutma sistemi ile tanktaki peyniraltı suyunun sıcaklığı 22 °C ± 1 °C'de sabit tutulmuştur.

Mikrofiltrasyon işlemi peyniraltı suyuna belirlenen dozlarda kitosan eklendikten sonra yapılmıştır. Her deneyden önce ve sonra saf su ile filtrasyon yapılarak deney düzeneği temizlenmiştir.

Laboratuvar ölçekli membran sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Laboratuvar ölçekli mikrofiltrasyon membran sistemi

2.5 Box-Behnken istatistiksel deney tasarım yöntemi

Box-Behnken istatistiksel deney tasarım yöntemi, bağımsız değişkenler ile yanıt fonksiyonları arasındaki ilişkiyi araştırmak ve optimum koşulları tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bir deney tasarım modelidir. Bu yöntem, diğer yanıt yüzeyi metodolojisi tasarımlarına göre

daha az çalışmaya ihtiyaç duyar, deneysel olarak çalışılmamış orta düzeylerde verimlilik sağlar ve gösterir [19]. Bu çalışmada, üç faktörlü ve üç seviyeli Box-Behnken istatistiksel deney tasarımı kullanılarak, peyniraltı suyunun mikrofiltrasyonu sırasında seçilen bağımsız değişkenlerin optimizasyonu amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında Design Expert 13.0 (deneme sürümü) kullanılmıştır.

Box-Behnken istatistiksel deney tasarım yöntemi işletme parametrelerinin süzüntü akısı ve KOİ giderme verimleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Optimizasyon için belirlenen bağımsız değişkenler kitosan konsantrasyonu (X₁), membran basıncı (X₂) ve mikrofiltrasyon süresidir (X₃). Bağımsız değişkenler için çalışma aralığı ön deneylere göre belirlenmiştir. Her değişken, -1, 0 ve 1 arasında üç seviyede kodlanmış ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu kodlamalar düşük, orta ve yüksek seviyeleri temsil etmektedir. Deney tasarımı sonucunda, 3 merkezi kodlama seviyesine sahip 12 farklı birleşik kodlanmış seviye ile 15 deney yapılmıştır. Bütün bağımsız değişkenlerin orta seviyede olduğu merkez noktasında (0,0,0) deneyler üç kez tekrarlanmıştır.

Tablo 2. Box-Behnken deney tasarımı için bağımsız değişkenler ve değerleri

Bağımsız değişken	Sembolü	Kodlanmış seviyesi		
		-1	0	+1
Kitosan konsantrasyonu (mg/l)	X ₁	5	15	25
Membran basıncı (bar)	X ₂	1	1.5	2
Mikrofiltrasyon süresi (dakika)	X ₃	30	75	120

Box-Behnken istatistiksel deney tasarım metodu sayesinde, yanıt fonksiyonu (Y) ile seçilen bağımsız değişkenler (X) arasında matematiksel bir ilişki kurulmaktadır. Bu ilişki, Denklem (1)'de gösterildiği gibi ikinci dereceden bir polinom denklemi ile ifade edilebilir:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (1)$$

Burada; Y: verim, b₀: sabit, b₁, b₂, b₃: doğrusal katsayılar, b₁₂, b₁₃, b₂₃: çapraz ürün katsayıları, b₁₁, b₂₂, b₃₃: ikinci dereceden katsayılarıdır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Box-Behnken istatistiksel deney tasarım yöntemi sonuçları

Box-Behnken deneysel tasarım metoduna göre düşük, orta ve yüksek seviyelerde belirlenen bağımsız değişkenlerin değerleri ile belirlenen koşullarda yapılan deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Deneyler sonucunda merkez noktasında hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 3, Deney no 2, 7 ve 12). Bu durum verilerin tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir.

DeneySEL çalışmalar yapıldıktan sonra, Box-Behnken istatistiksel yaklaşımıyla tahmin edilen sonuçlar da belirlenir. Gözlemlenen ve tahmin edilen sonuçlar arasındaki korelasyon katsayısı, Box-Behnken yönteminin uygulanabilirliğini belirlemek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmadaki korelasyon katsayıları Design Expert 13.0 regresyon programı kullanılarak belirlenmiştir. Aynı programla süzüntü akısı (Y_1) ve KOİ giderme verimi (Y_2) için bağımsız değişken katsayıları da belirlenmiştir. Belirlenen katsayılara göre düzenlenen yanıt fonksiyonları **Denklem (2)** ve **(3)**'de verilmektedir.

$$Y_1(\text{Süzüntü akısı}) = + 9.70440 - 0.135833 X_1 + 11.21667 X_2 + 0.009383 X_3 + 0.030000 X_1X_2 + 0.000444 X_1X_3 - 0.035556 X_2X_3 + 0.000583 x_{1^2} - 1.76667 x_{2^2} - 0.000070 x_{3^2} \quad (2)$$

$$Y_2(\text{KOİ giderimi}) = + 53.78981 + 2.68000 X_1 - 13.85000 X_2 + 0.066605 X_3 + 0.225000 X_1X_2 - 0.002500 X_1X_3 + 0.013333 X_2X_3 - 0.085667 x_{1^2} + 2.03333 x_{2^2} - 0.000218 x_{3^2} \quad (3)$$

Denklemlerden yararlanarak bağımsız değişkenlerin (kitosan konsantrasyonu, basınç ve mikrofiltrasyon süresi) yanıt fonksiyonları (süzüntü akısı ve KOİ giderme verimi) üzerindeki etkileri hakkında yorum yapılabilir. Yorum yapılırken yanıt fonksiyonundaki katsayıların işaret ve büyüklükleri dikkate alınır. **Denklem (2)**'ye göre süzüntü akısı basınç ve mikrofiltrasyon süresiyle artmakta, kitosan konsantrasyonu ile azalmaktadır. En büyük katsayıya sahip olan değişken (X_2) basınçtır. Dolayısıyla süzüntü akısının en çok arttıran değişken basınç olacaktır. **Denklem (3)**'e göre KOİ giderme verimi kitosan konsantrasyonu ve mikrofiltrasyon süresi ile artmakta, basınç ile azalmaktadır. Süzüntü akısında olduğu gibi KOİ gideriminde de en etkili parametre basınçtır.

Süzüntü akısı ve KOİ giderme verimleri için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA, yapılan analizlerin istatistiksel önemini belirlemek için kullanılmaktadır. ANOVA ile hesaplanan tahmini korelasyon katsayısı (R^2) ve hesaplanmış korelasyon katsayısı ile model tarafından belirlenen ve deneysel olarak bulunan değerler arasındaki uyum belirlenir. p değerleri, uygulanan modelin ve model terimlerinin anlamlı olup olmadığı ile ilgili bilgi vermektedir. Model p değerinin 0.05'ten küçük (<0.05) olması uygulanan modelin deney sonuçlarını yorumlamak için anlamlı olduğunu gösterir [20]. Model terimleri için p değerlerinin 0.1000'den büyük olması ise (> 0.1000) model terimlerinin anlamlı olmadığını ifade etmektedir [21].

Tablo 3. Box- Behnken deney tasarımına göre kodlanmış değerler ve yanıt değerleri

Deney numarası	Kitosan konsantrasyonu (mg/l)	Membran basıncı (bar)	Mikrofiltrasyon süresi (dakika)	Süzüntü akısı (l/m ² .sa)	KOİ giderimi (%)			
1	(-1)	5	(0)	1.5	(+1)	120	16.1	56.2
2	(0)	15	(0)	1.5	(0)	75	18.1	66.0
3	(-1)	5	(-1)	1	(0)	75	16.5	58.3
4	(+1)	25	(0)	1.5	(+1)	120	15.8	59.5
5	(-1)	5	(0)	1.5	(-1)	30	20.7	52.3
6	(0)	15	(-1)	1	(+1)	120	14.3	68.2
7	(0)	15	(0)	1.5	(0)	75	18.2	66.0
8	(0)	15	(+1)	2	(-1)	30	22.4	63.4
9	(+1)	25	(+1)	2	(0)	75	19.3	59.9
10	(-1)	5	(+1)	2	(0)	75	19.9	52.8
11	(0)	15	(-1)	1	(-1)	30	17.1	67.5
12	(0)	15	(0)	1.5	(0)	75	18.1	66.1
13	(+1)	25	(0)	1.5	(-1)	30	19.6	60.1
14	(+1)	25	(-1)	1	(0)	75	15.3	60.9
15	(0)	15	(+1)	2	(+1)	120	16.4	65.3

Süzüntü akısı ve KOİ giderme verimleri için yapılan varyans analizi sonuçları **Tablo 4**'te verilmektedir.

Tablo 4. Yanıtlar (Süzüntü akısı ve KOİ giderimi) için ANOVA sonuçları

Terimler	Süzüntü akısı		KOİ giderimi	
	F değeri	p değeri	F değeri	p değeri
Model	824.41	< 0.0001	593.70	< 0.0001
X ₁ (kitosan konsantrasyonu)	137.14	< 0.0001	785.67	< 0.0001
X ₂ (basınç)	2933.57	< 0.0001	330.96	< 0.0001
X ₃ (süre)	3962.14	< 0.0001	63.21	0.0005
X ₁ X ₂	9.64	0.0267	73.55	0.0004
X ₁ X ₃	17.14	0.0090	73.55	0.0004
X ₂ X ₃	274.29	< 0.0001	5.23	0.0709
X ₁ ²	1.35	0.2983	3936.61	< 0.0001
X ₂ ²	77.17	0.0003	13.86	0.0137
X ₃ ²	7.94	0.0372	10.46	0.0231
R ² (tahmini)	0.9981		0.9974	
R ² (hesaplanmış)	0.9805		0.9953	

Tablo 4 incelendiğinde, model p değerlerinin akı ve KOİ giderimi için 0.0001'den küçük olduğu görülmektedir. Bu da seçilen tüm bağımsız değişkenlerin anlamlı olduğunu ve kullanılan modelin deneysel değerlerin tahmini için uygun bir model olabileceğini göstermektedir.

Süzüntü akısı için 824.41 olan model F değeri, modelin istatistiki açıdan anlamlı olduğunu ifade etmektedir. 0.05'ten küçük p değeri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Buna göre modelin 0.0001'den düşük olan p değeri, sunulan modelin akı için uygunluğunu ifade etmektedir. Süzüntü akısı için X₁² dışındaki bütün model terimlerinin önemli olduğu söylenebilir. 0.9981 ve 0.9805 olarak bulunan tahmini ve hesaplanmış korelasyon katsayısı (R²) değerleri modelin istatistiki açıdan deneysel sonuçlara uygun olduğunu göstermektedir.

Model F değeri KOİ giderme verimi için 593.70, p değeri <0.0001 olarak hesaplanmıştır. Bu durum seçilen modelin istatistiki olarak anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Model p değerleri dikkate alındığında KOİ giderimi için X₁, X₂, X₃, X₁X₂, X₁X₃, X₁², X₂², X₃² terimlerinin önemli olduğu söylenebilir. Tahmini ve hesaplanmış korelasyon katsayısı (R²) değerleri (0.9974 ve 0.9953) modelin deneysel sonuçlara kesinlikle uygun olduğunu göstermiştir.

Deneysel verilerin 3 boyutlu grafiğinin çizilebilmesi için uygunluk hassasiyeti değerinin en az 4 olması gerekmektedir [17]. Design Expert 13.0 programıyla yapılan veri analizi sonucunda uygunluk hassasiyeti değeri süzüntü akısı için 101.42, KOİ giderimi için ise 73.12 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple süzüntü akısındaki ve KOİ giderme verimindeki değişimlerin grafikleri 3 boyutlu olarak çizilmiştir.

3.2 Süzüntü akısındaki değişim

Bağımsız değişkenlerdeki değişimin yanıt fonksiyonları üzerindeki etkileri Design Expert 13.0 programına göre 3 boyutlu yüzey çizimleri yapılarak değerlendirilmiştir. Grafikler çizilirken bağımsız değişkenlerden bir tanesi sabit seviyede tutulmuştur. Kitosan konsantrasyonu, basınç ve mikrofiltrasyon süresinin süzüntü akısı üzerindeki etkileri **Şekil 2**'de gösterilmektedir. **Şekil 2 (a)**'de mikrofiltrasyon süresi 75 dakikada sabit tutulurken **Şekil 2 (b)**'de kitosan konsantrasyonu 15 mg/l'de, **Şekil 2 (c)**'de ise basınç 1 bar'da sabitlenmiştir.

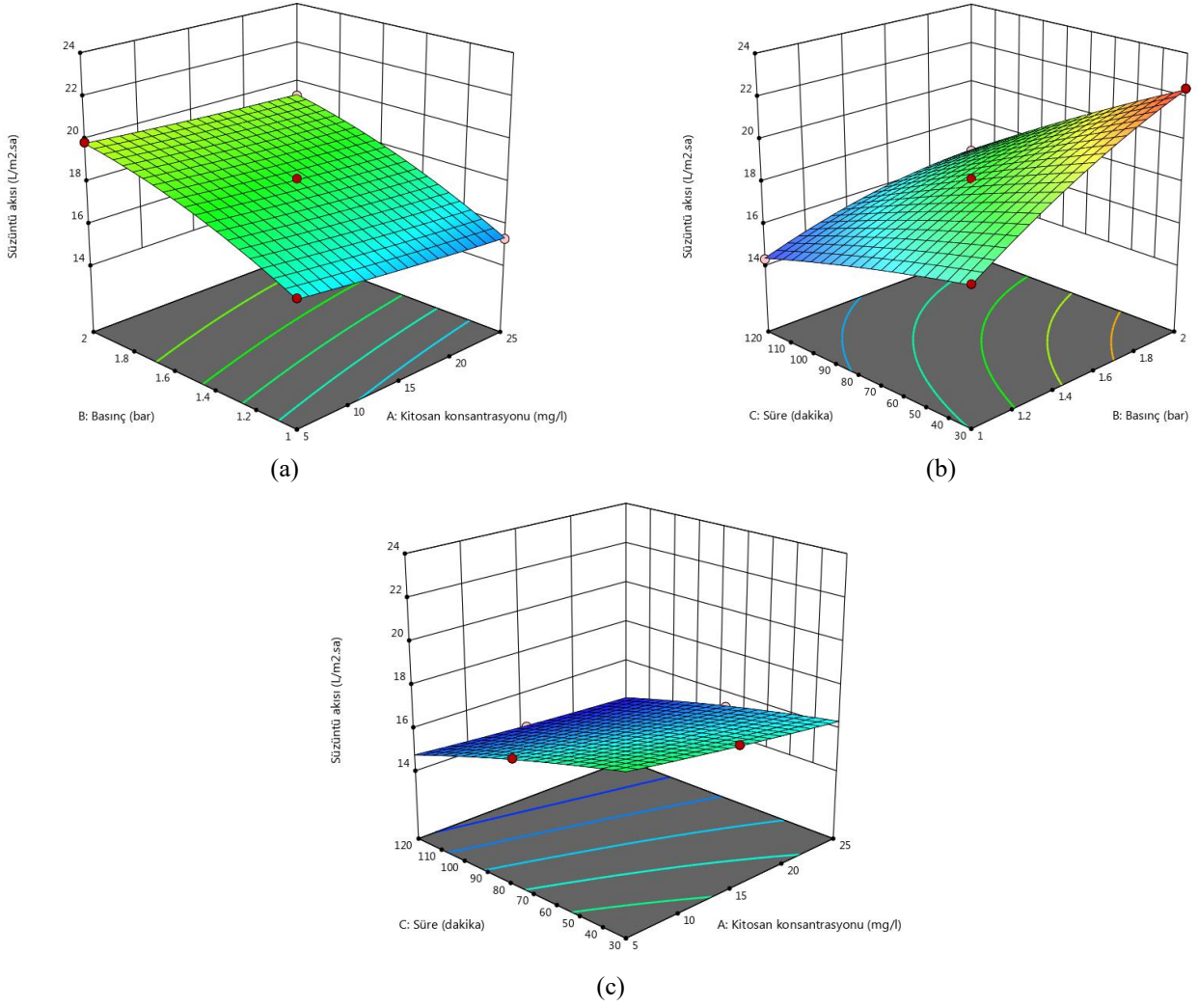
Süzüntü akısının kitosan konsantrasyonu ile değişimi incelenecek olursa, artan kitosan konsantrasyonu ile akının azaldığı görülebilir (**Şekil 2a ve 2c**). 1 bar basınçta yapılan mikrofiltrasyon deneylerinde, 5 mg/l kitosan konsantrasyonunda elde edilen süzüntü akısı 16.5 l/m².sa iken, kitosan 25 mg/l'ye çıktığında akı 15.3 l/m².sa'e düşmüştür. Aynı durum diğer basınç değerlerinde de gözlenmiştir. Peyniraltı suyuna eklenen kitosan konsantrasyonu arttıkça membran yüzeyi kitosan ile kaplanmakta ve bu durumda süzüntü akısı azalmaktadır [22].

Süzüntü akısı artan mikrofiltrasyon süresi ile azalmaktadır (**Şekil 2b ve 2c**). 1 bar basınçta 30 dakikada ölçülen akı değeri 17.1 l/m².sa iken 120 dakikada ölçülen akı 14.3 l/m².sa olmuştur. Aynı süreler için 2 bar basınçta ölçülen akı değerleri sırasıyla 22.4 l/m².sa ve 16.4 l/m².sa'dır.

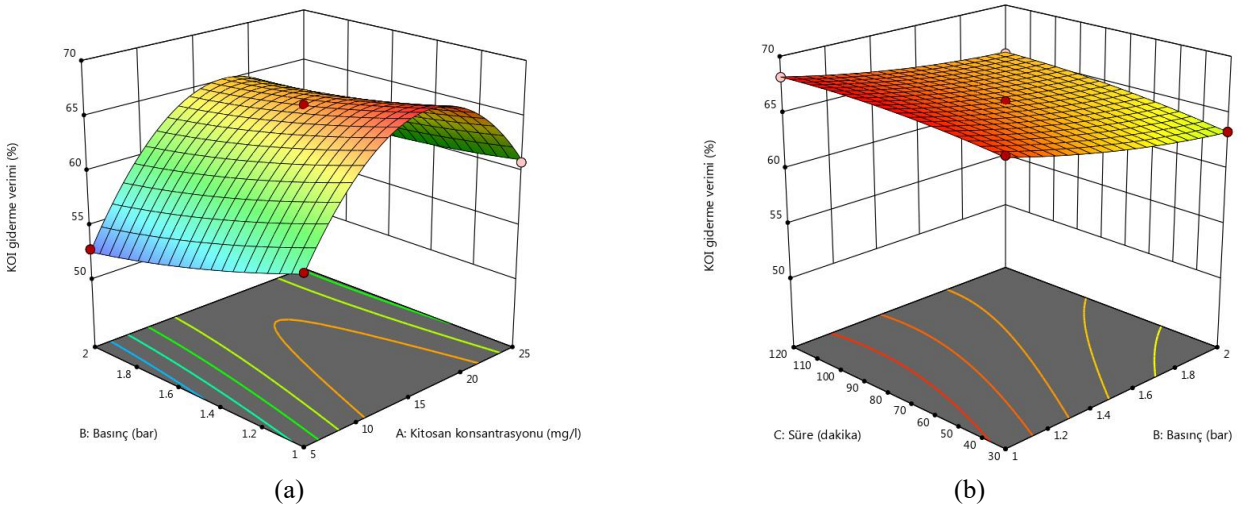
Süzüntü akısındaki en büyük değişim basınç etkisiyle gerçekleşmiştir. **Şekil 2 (a)** ve **(b)**'den de görüleceği gibi, basınçtaki artış süzüntü akısını da arttırmaktadır. Kitosan konsantrasyonu 15 mg/l, mikrofiltrasyon süresi 30 dakika ve basınç 1 bar iken akı 17.1 l/m².sa olmuştur. Kitosan konsantrasyonu ve süre sabit tutulup basınç 2 bar'a çıktığında ise akı 22.4 l/m².sa'e yükselmiştir. Darcy yasasına göre, artan basınç gradyanı süzüntü akısını da arttırmaktadır. Palmiye yağı atıksularıyla yapılan bir ultrafiltrasyon çalışmasında 30 dakikalık ultrafiltrasyon süresinde 1 bar basınçta 40 l/m².sa süzüntü akısı elde edilirken, basıncın 2 bara çıkmasıyla akının 55 l/m².sa'e yükseldiği görülmüştür [23]. Zeytinyağı endüstrisi atıksularının ultrafiltrasyon membranıyla arıtımının incelendiği bir çalışmada ise 30 dakikalık ultrafiltrasyon süresinde 1 ve 3 bar basınçta elde edilen süzüntü akısı değerleri sırasıyla 7 l/m².sa ve 25 l/m².sa olmuştur [24]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar diğer yazarların bulgularıyla uyumludur.

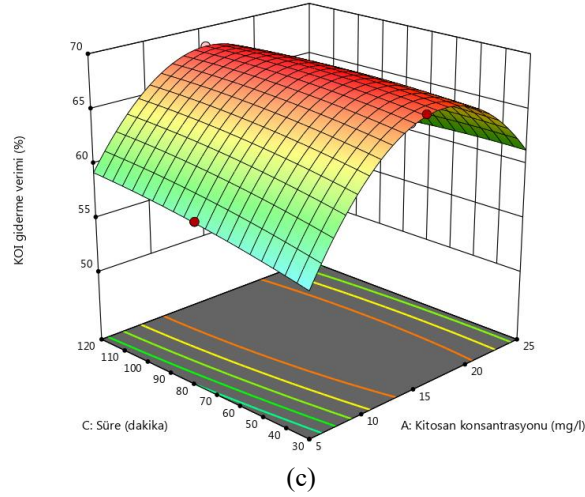
3.3 KOİ giderme verimindeki değişim

Çalışmanın ikinci bölümünde kitosan konsantrasyonu, basınç ve mikrofiltrasyon süresinin KOİ giderme verimi üzerindeki etkileri araştırılmış, sonuçlar 3 boyutlu grafik olarak **Şekil 3 (a)**, **(b)** ve **(c)**'de verilmiştir.



Şekil. 2. Süzüntü akısının (a) 75 dakika mikrofiltrasyon süresinde kitosan konsantrasyonu ve basınçla (b) 15 mg/l kitosan konsantrasyonunda basınç ve mikrofiltrasyon süresiyle (c) 1 bar basınçta mikrofiltrasyon süresi ve kitosan konsantrasyonu ile değişimi





Şekil 3. KOİ giderme veriminin (a) 75 dakika mikrofiltrasyon süresinde kitosan konsantrasyonu ve basınçla (b) 15 mg/l kitosan konsantrasyonunda basınç ve mikrofiltrasyon süresiyle (c) 1 bar basınçta mikrofiltrasyon süresi ve kitosan konsantrasyonu ile değişimi

Kitosan yapısı gereği amino grupları içermektedir. Bu gruplar kitosanı kationik bir polielektrolit ($pK_a \approx 6.5$) yapar. Bu nedenle kitosan $pH < 6.5$ 'te sulu asidik ortamda çözünür ve çözüldüğünde tek bağ NH_3^+ grupları üzerinde yüksek bir pozitif yüke sahiptir. Peyniraltı suyunda bulunan negatif yüklü protein moleküllerini çeker ve organik madde içeriğini önemli ölçüde azaltır [25].

KOİ giderme veriminin kitosan konsantrasyonu ile değişimi incelendiği zaman (Şekil 3a ve 3c), verimin öncelikle artan kitosan konsantrasyonu ile arttığı, 15 mg/l gibi bir konsantrasyondan sonra ise kitosandaki artış ile verimin azaldığı görülmüştür. 1 bar basınçta 5, 15 ve 25 mg/l kitosan konsantrasyonları için elde edilen KOİ giderme verimleri sırasıyla %58, %66 ve %61'dir. Düşük kitosan konsantrasyonu, KOİ giderim verimliliği üzerinde daha az etkilidir. Yüksek konsantrasyonda kitosan kullanımında ise kitosanın organik içeriği nedeniyle KOİ konsantrasyonu da artmıştır. İncelenen bütün basınçlarda maksimum KOİ giderme verimleri 15 mg/l kitosan konsantrasyonunda elde edilmiştir. Bir çalışmada kitosan koagülasyonu ve mikrofiltrasyon kullanılmış, 15 mg/l kitosan konsantrasyonu ve 1 bar basınçta %68.1 KOİ giderme verimi elde edilmiştir [16]. Yaptığımız çalışmada elde edilen sonuç, bu çalışmayla uyum içindedir.

Membranın performansını değerlendirmek için, farklı basınç değerlerinde süzüntüdeki KOİ giderim verimleri de incelenmiştir. Şekil 3 (a) ve 3 (b)'den de görüldüğü gibi, basınçtaki artış artırılmış sudaki KOİ giderme verimini düşürmektedir. Kitosan konsantrasyonunun 15 mg/l ve mikrofiltrasyon süresinin 30 dakikada sabit tutulduğu koşullarda, 1 bar basınçta KOİ giderme verimi %68 iken 2 bar basınçta verim %63'e düşmüştür. Bunun nedeni, daha yüksek basınçlarda basınç etkisinin gözenek boyutu etkisinden baskın olmasıdır. Sonuç olarak membrandan daha fazla organik bileşik geçmektedir [26]. Süzüntüdeki KOİ konsantrasyonu arttıkça KOİ giderme verimi azalmaktadır.

KOİ giderme veriminin basıncın bir fonksiyonu olarak mikrofiltrasyon süresi ile değişimi Şekil 3 (b)'de verilmiştir.

Tüm mikrofiltrasyon periyodu boyunca KOİ giderme veriminde önemli bir fark gözlenmemiştir. 2 bar basınçta 30 dakika mikrofiltrasyon süresinde elde edilen KOİ giderim verimi %67.5 iken, 120 dakika filtrasyon süresinde verim %67.8 olmuştur. Mikrofiltrasyon süresindeki artış işletme masrafını arttıracığı için 30 dakikalık filtrasyon süresi yeterli olacaktır.

3.4 Optimizasyon

Peyniraltı sularının kitosan koagülasyonu ile mikrofiltrasyonunu daha detaylı incelemek için kullanılan, Design Expert 13 programı ile gerçekleştirilen yanıt yüzey yöntemi olan Box Behnken tasarımı ile maksimum süzüntü akısı ve KOİ giderme verimine karşılık bağımsız değişkenlerin optimizasyonu yapılmış ve sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'e göre optimum proses değişkenleri kitosan konsantrasyonu, basınç ve mikrofiltrasyon süresi için sırasıyla 17.47 mg/l, 2 bar ve 30 dakika olarak belirlenmiştir. Bu proses koşullarında süzüntü akısı $22.24 \text{ l/m}^2 \cdot \text{sa}$ ve KOİ giderme verimi %64.05'tir. Box-Behnken tasarımı için Design Expert 13 tarafından hesaplanan arzu edilebilirlik değeri ise 0.951 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Süzüntü akısı ve KOİ giderimi için optimum standartlar ve optimizasyon değerleri

	Optimizasyon standardı					
	Hedef aralık	Alt sınır	Üst sınır			
A: Kitosan konsantrasyonu	5 - 25	5	25			
B: Basınç	1 - 2	1	2			
C: Süre	30 - 120	30	120			
Süzüntü akısı	maksimum	14.3	22.4			
% KOİ giderme verimi	maksimum	52.3	68.2			
Optimum değerler						
Sayı	Kitosan konsantrasyonu (mg/l)	Basınç (bar)	Süre (dakika)	Süzüntü akısı ($\text{l/m}^2 \cdot \text{sa}$)	KOİ giderim i (%)	Arzu edilebilirlik
1	17.47	2	30	22.24	64.05	0.951

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, peynir üretimi sırasında açığa çıkan peyniraltı suyu mikrofiltrasyon membranından geçirilmiştir. Mikrofiltrasyon işlemi ham peyniraltı suyuna belirlenen dozlarda kitosan eklendikten sonra yapılmıştır. Kitosan konsantrasyonu, membran basıncı ve mikrofiltrasyon süresi gibi temel işletim parametrelerinin süzüntü akısı ve KOİ giderme verimleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada Box-Behnken deneysel tasarım metodunun peyniraltı suyunun mikrofiltrasyonunda akı ve KOİ giderimi için uygulanabileceği kanıtlanmıştır. Yapılan varyans analizi sonunda tahmini ve hesaplanmış R² değerleri sırasıyla, süzüntü akısı için 0.9981 ve 0.9805, KOİ giderme verimi için 0.9974 ve 0.9953 olarak bulunmuştur. Bu da yanıt fonksiyonundan elde edilen tahminler ile yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının uyum içinde olduğunu göstermektedir. Kullanılan Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi istatistikî açıdan uygundur.

Yapılan çalışmalar sonucunda süzüntü akısının basınç ile arttığı, kitosan konsantrasyonu ve mikrofiltrasyon süresi ile azaldığı görülmüştür. En yüksek KOİ giderme verime ulaşılan koşullar ise 15 mg/l kitosan konsantrasyonu, 1 bar basınç ve 30 dakika mikrofiltrasyon süresi olmuştur.

Design Expert 13 programı ile hesaplanan optimum kitosan konsantrasyonu, basınç ve mikrofiltrasyon süresi sırasıyla 17.47 mg/l, 2 bar ve 30 dakika olarak belirlenmiştir. Bu koşullarında süzüntü akısı 22.24 l/m².sa ve KOİ giderme verimi %64.05 olarak hesaplanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

Kaynaklar

- [1] T.T. Bayram, A. Nuhuğlu, Süt endüstrisi atıksularının biyolojik arıtımında mikroorganizma konsantrasyonu ile akı profilinin değişimi ve kullanılan membranın temizlenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2 (2), 9-20, 2013. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239377>.
- [2] M.I.G. Siso, The biotechnological utilization of cheese whey: A review, Bioresource Technology, 57 (1): 1-11, 1996. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00036-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00036-3).
- [3] F. Carvalho, A.R. Prazeres, J. Rivas, Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. Science of The Total Environment, 445-446, 385-396, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.038>.
- [4] S.V. Kalyuzhnyi, E.P. Martinez, R. Martinez, Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors, Bioresource Technology, 60, 59-65, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(96\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00176-9).
- [5] G. Güven, A. Perendeci, A. Tanyolaç, Electrochemical treatment of deproteinated whey wastewater and optimization of treatment conditions with response surface methodology, Journal of Hazardous Materials, 157, 69-78, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.12.082>.
- [6] B. Ekka, I. Mierin, T. Juhna, K. Kokina, M. Turks, Synergistic effect of activated charcoal and chitosan on treatment of dairy wastewaters, 31, 103477, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103477>.
- [7] E.S. Mansor, E.A. Ali, A.M. Shaban, Tight ultrafiltration polyethersulfone membrane for cheese whey wastewater treatment, Chemical Engineering Journal, 407, 127175, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127175>.
- [8] B. Sarkar, P.P. Chakrabarti, A. Vijaykumar, V. Kale, Wastewater treatment in dairy industries —Possibility of reuse, Desalination, 195, 141-152, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.11.015>.
- [9] H. Odegard, Optimization of flocculation/flotation in chemical wastewater treatment, Water Science and Technology, 19, 1233-1237, 1995. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)99878-8](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)99878-8).
- [10] B. Rusten, Chemical pretreatment of dairy wastewater, Water Science and Technology, 28, 67-72, 1993. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0078>.
- [11] R. Mukhopadhyay, D. Talukdar, B. Chatterjee, A. Guha, Whey processing with chitosan and isolation of lactose. Process Biochemistry, 39, 381-385, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00126-2](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00126-2).
- [12] E.S. Olsen, H.C. Ratnaweera, R. Pehrson, A novel treatment process for dairy wastewater with chitosan produced from shrimp-shell waste, Water Science and Technology, 34, 33-40, 1996. <https://doi.org/10.2166/wst.1996.0260>.
- [13] A.R. Prazeres, F. Carvalho, J. Rivas, Cheese whey management: A review, Journal of Environmental Management, 110, 48-68, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>.
- [14] G.L. Munizz, A.C. Borges, T.C. F. Silva, R.O. Batista, S.R. Castro, Chemically enhanced primary treatment of dairy wastewater using chitosan obtained from shrimp wastes: optimization using a Doehlert matrix design, Environmental Technology, 43(2):237-254, 2022. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1783372>.
- [15] A. C. Bortoluzzi, C. E. D. Oro, M. S. N. Santos, M. L. Mignoni, R. M. Dallago, J. Stefens, M. V. Tres, Combination of chemical coagulation and membrane-based separation for dairy wastewater treatment Journal of Food Science and Technology 60(1):84-91, 2023, <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05590-2>.
- [16] E.O. Akdemir, A. Ozer, Pretreatment of cheese whey effluent by microfiltration process: A statistical design approach, Ekoloji, 22 (88), 21-27, 2013. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2013.883>.
- [17] E.O. Akdemir, Zeytinyağı endüstrisi atıksularının kitosan ile koagülasyonunda Box-Behnken istatistiksel deney tasarım yönteminin uygulanması, Bilecik Seyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 241-248, 2022. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1009083>.
- [18] R.B. Baird, A.D. Eaton, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, A.B.D. 2017.
- [19] N. Genç, E. Durna, H.K.K. Cicigün, Response surface

- modeling and optimization of microwave-activated persulfate oxidation of olive oil mill wastewater, *Clean Soil Air Water*, 48, 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1002/clen.201900198>.
- [20] R. Singh, P. Bhunia, R.R. Dash, Optimization of organics removal and understanding the impact of HRT on vermifiltration of brewery wastewater. *Science of the Total Environment*, 651, 1283-1293, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.307>.
- [21] L. Hu, G. Zhang, M. Liu, Q. Wang, P. Wang, Optimization of the catalytic activity of a $ZnCo_2O_4$ catalyst in peroxydisulfate activation for bisphenol A removal using response surface methodology, *Chemosphere*, 212, 152-161, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.065>.
- [22] E.O. Akdemir, E. Aygan, Pretreatment of olive mill wastewater by ultrafiltration process using chitosan, *Desalination and Water Treatment*, 142, 49-55, 2019. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23407>.
- [23] A.L. Ahmad, S. Ismail, S. Bhatia, Ultrafiltration behavior in the treatment of agro-industry effluent: Pilot scale studies, *Chemical Engineering Science*, 60, 5385-5394, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.04.021>.
- [24] E.O. Akdemir, A. Ozer, Application of a statistical technique for olive oil mill wastewater treatment using ultrafiltration process, *Separation and Purification Technology*, 62, 222-227, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.01.006>.
- [25] B. Krajewska, Membrane-based processes performed with use of chitin/chitosan materials, *Separation and Purification Technology*, 41(3), 305-312, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.03.019>.
- [26] T. Mohammadi A. Esmaelifar, Wastewater treatment of a vegetable oil factory by a hybrid ultrafiltration-activated carbon process, *Journal of Membrane Science*, 254, 129-137, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.12.037>





Investigation of urban heat island and carbon monoxide change using Google Earth engine in Konya

Konya'da kentsel ısı adası ve karbon monoksit değişiminin Google Earth engine kullanılarak incelenmesi

Duygu Arıkan^{1,*} , Ferruh Yıldız² 

^{1,2} Konya Technical University, Department of Geomatics Engineering, 42250, Konya, Türkiye

Abstract

The increasing population has been causing changes in and around urban areas. As a result of this situation, it is observed that the amount of heat and air pollution in cities is higher than in rural areas. Urban heat islands (UHI) are a factor that affects people's quality of life. Therefore, monitoring temperature changes and taking regional measures is necessary. In this study, urban heat island (UHI) and carbon monoxide (CO) levels were determined using Landsat 8 satellite for the years 2019-2021 and Sentinel-5P satellite, respectively. The central districts of Konya were selected as the study area. To determine the urban heat island (UHI), surface temperature (ST) maps were created using the thermal band of a total of 12 Landsat 8 satellite images for each season. Additionally, 36 CO maps were generated using the Sentinel-5P satellite for the same region, covering twelve months. Upon evaluation of the generated maps, a significant correlation between temperatures and CO was observed. It was determined that areas with higher surface temperature also exhibited higher levels of carbon monoxide.

Keywords: Urban heat islands, Land surface temperature, Air quality, Carbon monoxide, National air quality monitoring station

1 Introduction

The increase in air temperatures in urban areas compared to rural areas due to climate change is referred to as the "heat island" phenomenon [1]. The differentiation that occurs as a result of human factor and climate effects has emerged as the concept of "urban heat island" [1-4].

The occurrence of climate change depends on both external factors and naturally occurring internal factors. For example, human-induced changes in land use can be one factor, while changes in the composition of the atmosphere can be another factor [5]. Many studies have proven that changes in the land surface and land uses have an impact on the urban heat island [6-8].

According to the United Nations population data, the majority of the world's population lives in urban areas and their numbers are increasing. As of 2021, Turkey constitutes 1.1% of the world population with 84 million 680 thousand 273 people [9]. The increasing human population leads to

Öz

Nüfusun artması kentlerde ve çevresinde değişiklikler meydana getirmektedir. Bu duruma bağlı olarak kentlerdeki ısı miktarı ve hava kirliliğinin kırsal alana göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Kentsel ısı adası insanın yaşam kalitesini etkileyen bir faktördür. Bu sebeple ısı değişikliklerinin izlenmesi, bölgesel olarak tedbir ve önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, 2019 – 2021 yılları arasında Landsat 8 uydusu kullanılarak kentsel ısı adası ve Sentinel-5P uydusu kullanılarak karbonmonoksit (CO) durumu belirlenmiştir. Çalışma bölgesi olarak Konya'nın merkez ilçeleri seçilmiştir. Kentsel ısı adasını (KIA) belirlemek için her mevsime ait toplam 12 adet Landsat 8 uydu görüntüsünün termal bandı kullanılarak yer yüzey sıcaklığı (YYS) haritaları oluşturulmuştur. Ayrıca aynı bölge için Sentinel-5P uydusu kullanılarak on iki aya ait 36 adet CO haritası oluşturulmuştur. Oluşturulan haritalar değerlendirildiğinde sıcaklık ve CO arasında anlamlı bir sonuç olduğu belirlenmiştir. YYS sıcaklığının fazla olduğu kısımlarda karbonmonoksit miktarının fazla olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kentsel ısı adası, Yer yüzey sıcaklığı, Hava kalitesi, Karbon monoksit, Ulusal hava kalitesi izleme istasyonu

efforts to meet the needs of urban areas, resulting in an increase in building construction, electricity consumption, transportation time, and use of fuels for heating purposes. These factors increase gas emissions into the atmosphere. The excessive rise in temperature can affect the quality of life for urban residents, leading to health problems [10,11]. To ensure human life can continue in a region, it is important to consider anthropogenic emissions, heat sources, vegetation coverage and soil impermeability, as they are crucial for human health and life [3,12,13]. Therefore, to ensure environmental sustainability, climate-friendly approaches such as preserving natural resources, reducing waste, increasing energy efficiency, implementing sustainable transportation systems, and increasing green areas should be adopted in urban areas.

Remote sensing data has enabled monitoring of both spatial and temporal changes on Earth, as well as offering solutions [14]. Advances in satellite technology have

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: darikan@ktun.edu.tr (D. Arıkan)

Geliş / Received: 07.04.2023 Kabul / Accepted: 03.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1279129

impacted sensor platforms and acquired various types of data (such as optical, thermal, and emission) easier [8,14-17]. Landsat, Aster, and Modis satellites offer free access to both thermal and optical data. Also, another example is the Sentinel satellite mission, which launched Sentinel-1 and Sentinel-2 satellites in 2015 to provide radar and optical data, and Sentinel-5P in 2017 to determine gas density in the atmosphere. The Sentinel-3 satellite, which has a thermal band, is aimed at environmental and climate monitoring [18].

In parallel with this development in satellite technology, new tools have been developed to analyze, evaluate, and model data [19]. One of these tools is the Google Earth Engine (GEE) software. It is a web-based software launched by Google in 2010 [19]. In addition to providing free access to users, it contains a data catalog that covers approximately 40 years of data. As a result, it is widely used to quickly analyze and interpret data in monitoring environmental changes (such as land cover/land use, disasters, climate change, soil, wetland or drought, forest and urban areas) [20-24].

There are weather stations that measure the temperature in urban and rural areas. However, various studies have shown that these stations are not evenly distributed over their working areas or do not allow for the global determination of temperature [25]. Therefore, in our study, UHI was calculated based on the three central districts of Konya, namely Karatay, Meram and Selçuklu, between 2019-2021,

and the UHI situation was examined using satellite imagery. In addition, carbon monoxide levels in the same region and time period were examined and their relationship was evaluated. Carbon monoxide data obtained from air quality stations in the region were also taken into account in the results.

2 Material and method

2.1 Study area

Konya, chosen as the study area, is the city with the largest surface area (39.000 km²) in Turkey. It is located between 36° 22' and 39° 08' north parallels and 31° 14' and 34° 05' east meridians (Figure 1). The city, which is one of the developed cities of the country, has a total of thirty-one districts. The current population announced by TÜİK in 2021 is 2,277,017, making it the sixth most populous province in the country [9]. The most populous district of the city is Selçuklu. The city, which has a hot and dry climate in summer and a cold and snowy climate in winter, has a terrestrial climate in general [26].

2.2 Data used

The UHI and carbon monoxide data were obtained from the Google Earth Engine (GEE) platform, which provides open access.

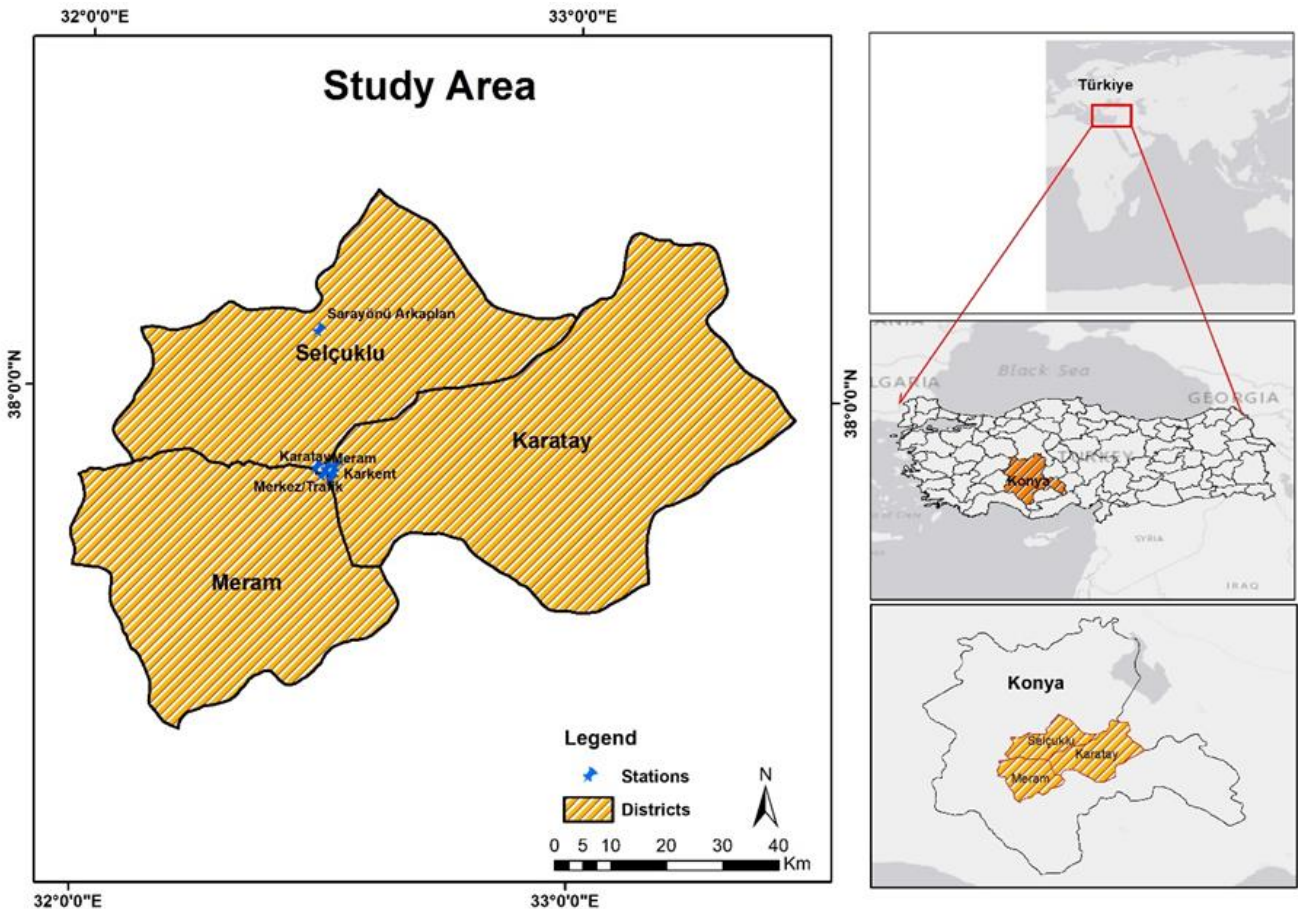


Figure 1. Study area (Three central districts of Konya city)

As a web-based application, it can run operations independently of the computer [27]. The application, developed in Python and JavaScript programming languages, consists of four parts in its interface (Figure 2). The first part contains the working files and a library consisting of sample codes within the program. The second part is an area where codes are written in the appropriate format and queries are made [28]. The third part provides the production of data results and allows them to be export, and the fourth part runs the visualization processes of the results. Data processing is done quickly and easily, and the results can be visualized. Additionally, as it runs in the cloud, it provides access to many satellite data over a wide date range within the platform [29]. In this study, Landsat-8 satellite imagery was used for the urban heat island, and Sentinel-5 satellite images were used for the carbon monoxide data.

Landsat 8 OLI/TIRS satellite was launched in 2013. The OLI sensor of the satellite consists of a 15-meter panchromatic band and eight multispectral bands with a 30-meter resolution. The satellite has a total of 11 bands, where the 10th and 11th bands are thermal bands [30]. The data can be accessed for free from the United States Geological Survey (USGS) [31]. The thermal bands of the satellite are mostly used in UHI studies [32-34].

In this study, the first thermal band of the satellite, the 10th band with has a 16-bit radiometric resolution, was preferred [30]. Because Yu, Guo, & Wu [35] and Jin, et. al, [36] used both thermal bands of the Landsat 8 satellite in their study. In line with the findings they obtained, it was determined that the 11th band value used to determine UHI was largely inconsistent with the other thermal band value [37, 38]. The wavelength of the thermal band used is 10.60 - 11.19 μm [30].

The Sentinel satellite mission has been providing radar and optical data since 2015 [39]. It also contributes to the

determination of gaseous pollutants in the atmosphere thanks to the Sentinel-5 satellite images sent by the European Space Agency on October 13, 2017 [39]. There is information on 14 different air pollutants such as carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), methane (CH₄), formaldehyde (HCHO), aerosol (AER_AI), sulfur dioxide (SO₂) and ozone(O₃).

With the help of various satellite images, detecting and analyzing LST is carried out cost-effectively and quickly. The spectral brightness data of the Landsat-8 satellite can be converted to the supra-atmospheric luminosity temperature using the constant thermal values (Table 1) found in the satellite data file. Afterward, LST can be calculated (Figure 3).

Table 1. Thermal constant values of Landsat-8 satellite

Radiance_Add_Band_10	0.10000000149011612
Radiance_Mult_Band_10	0.00033420001273043454
K1_Constant_Band_10	774.8853149414062
K2_Constant_Band_10	1321.078857421875

To determine the LST (Land Surface Temperature), it is necessary to first calculate the spectral brightness values of the thermal band's values to be used, and then convert them [40]. In this study, the 10th band of the satellite was used as the thermal band. Then, using the spectral reflection value, the brightness values are converted into temperature values. For this, the calibrated K1 and K2 coefficients are used before the satellite is sent [40, 41]. The coefficient K1 is used to determine the relationship between measured radiation values. By multiplying the measured radiation values of a pixel with K₁, the pixel's surface temperature is converted.

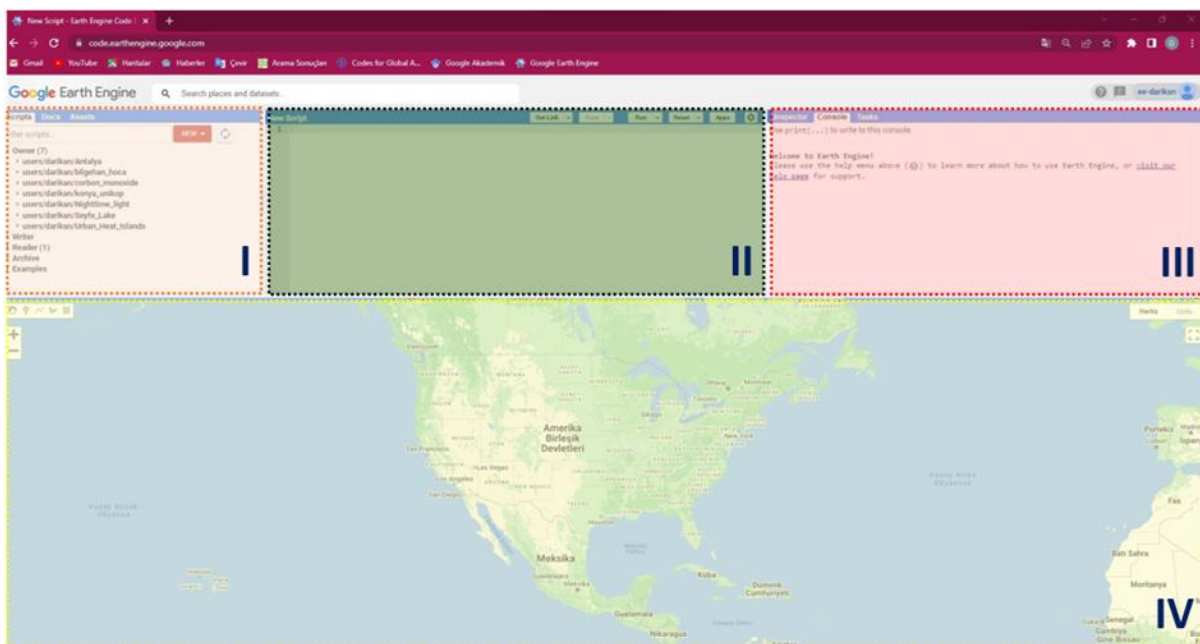


Figure 2. The interface of GEE software

The coefficient K_2 , on the other hand, is used to determine the relationship between radiation values with higher sensitivity. After multiplying the pixel's radiation value with the K_1 coefficient, the K_2 coefficient is added, resulting in the pixel's surface temperature.

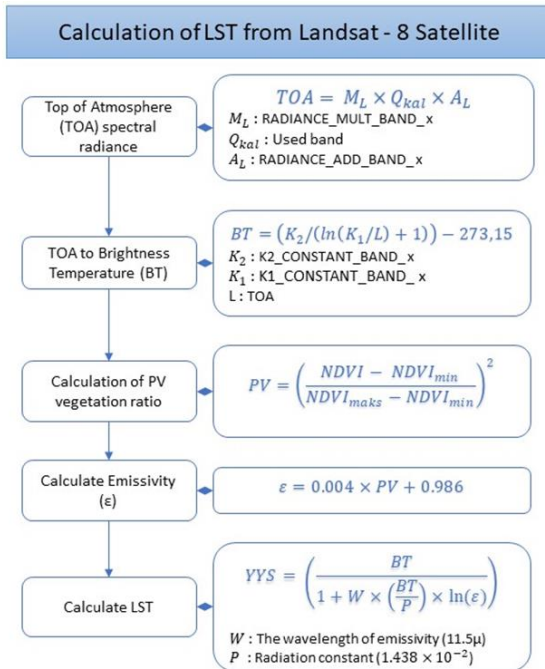


Figure 3. Process steps to calculate LST

In summary, the K_1 and K_2 coefficients are used to calculate the land surface temperature using thermal infrared data. These coefficients can vary depending on the characteristics of remote sensing systems and the sensors used. The reason for subtracting the value 273.15 in the conversion to Brightness Temperature (BT) is to adjust the result obtained in kelvins in degrees Celsius. As a result, a temperature value has been calculated, but emissivity correction must be made in order to determine the LST. In order to calculate the emissivity value (ϵ), it is necessary to know the PV vegetation ratio. For this, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vegetation index is used. This index gives information about the health status or growth of the plant as a result of measuring the bright intensities of different wavelengths reflected by the plants on the ground [42]. The NDVI vegetation index is calculated using the near infrared and red bands found in satellites. The main reason for using these bands is that the wavelengths at which plants are most efficient for photosynthesis are determined as red and infrared light [43,44]. The mathematical model of the NDVI index is given in Equation 1.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Using the equation, $NDVI_{min}$ and $NDVI_{max}$ values are calculated. Thanks to the data given in Table 1, the process

steps and mathematical expressions for the calculation of LST are briefly summarized in Figure 3.

3 Findings and discussion

Changes in cities are the areas most affected by climate change, although they cause climate change. In short, climate change and its impact in cities are directly proportional. For this reason, climate change and urban planning have become two concepts that cannot be considered separately from each other.

Landsat 8 satellite images were used to create the LST maps for 2019, 2020, and 2021, and the LST maps were created in the QGIS environment. Urban heat islands for 2019–2021 were examined as four seasons (spring, summer, autumn, and winter). Since there is a lack of data for the winter season of 2019, those parts are shown in white on the map. When examined at the winter season maps of 2020 and 2021, the average urban heat island is 6 degrees Celsius, while the amount of heat is lower in 2019. The temperature increases in the transition from winter to spring. Considering the effect of this situation, it was observed that the amount of urban heat increased in the spring season (Figure 4). In 2020, the heat was evenly distributed over the surface, around 21.30 °C on average. The amount of heat in 2021 has increased in some parts compared to other years, and it is reflected on the map, especially in the city center and parts of the transportation lines.

The annual heat amount of the maps created in Figure 4, depending on the seasons, is also expressed in Figure 5. In the spring season, the temperature of 2021 increased by 2.36 °C compared to 2019 and by 5.57 °C compared to 2020. While the ground surface temperature is around 34 °C in 2019 and 2020 in summer, it is 36.83 °C in 2021. While there is a decrease in ground surface temperature in the transition from summer to autumn in 2020 and 2021, it is seen that there is not much change in temperature in 2019.

In the study, it was discussed whether the heat situation in the urban area has a relationship with one of the air pollutants, carbon monoxide. For this purpose, both terrestrial data and remote sensing technology were used. Air quality monitoring stations installed in our country were used for terrestrial data. These stations were established by the Turkish Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change to be homogeneous throughout the country. When they were first installed in Erzurum and Samsun in 2015 to monitor air quality, they only collected sulfur dioxide (SO₂) and particulate matter data. Today, nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃) data and carbon monoxide (CO) data used in the study are also collected and are freely accessible [45]. The number of stations has been increasing day by day since the year it was established and as of 2022, there are 360 air quality stations. The number of stations in Konya is 12. While the number of stations established in Karatay, Selçuklu and Meram districts was 4 in 2019, it doubled in 2021. The carbon monoxide data collected by the stations in the study region and time interval are presented in Table 2.

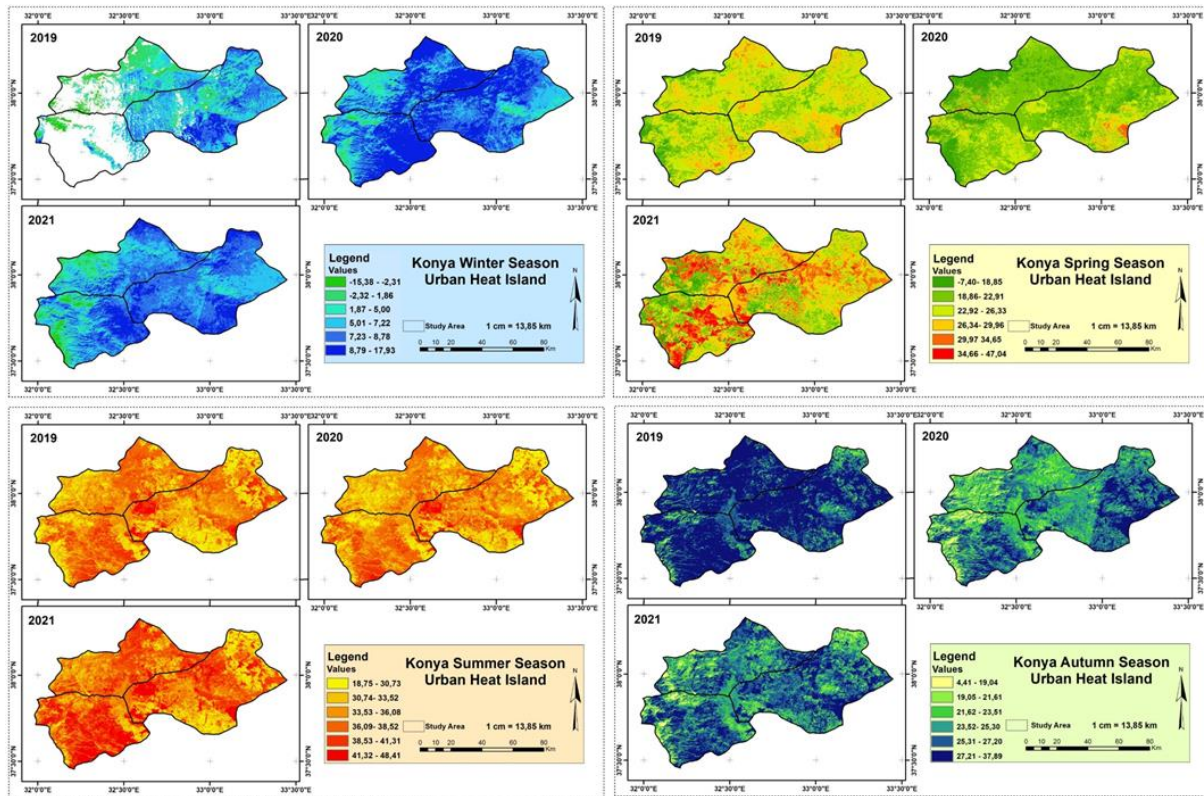


Figure 4. Urban heat islands in 2019-2021

Table 2. Carbon monoxide data obtained from the national air quality monitoring station

Year	Station Name	Minimum Value(mg/m ³)	Maximum Value(mg/m ³)	Mean Value(mg/m ³)	Number of Data (day)
2019	Karkent	306.68	3795.02	743.58	202
	Meram	763.42	9090.62	1361.51	203
	Erenköy-Belediye	92.75	3204.99	527.76	363
	Karatay	95.38	5263.03	802.15	327
	Karkent	192.25	2362.75	613.06	362
2020	Meram	17.86	4115.3	914.49	363
	Laboratuvar Yaygınlaştırma	71.93	1662.19	376.42	136
	Erenköy-Belediye	76.51	1754.42	514.87	354
	Karatay	60.55	4939.74	662.98	341
	Karatay (SunayPark)	88.53	5847.2	911.49	237
	Karkent	175.45	3948.49	663.56	323
	Meram	205.8	8357.07	903.29	335
2021	Merkez/Trafik	68.69	5892.96	828.82	243
	Laboratuvar Yaygınlaştırma	87.67	3539.13	429.28	197
	Erenköy-Belediye	151.13	3072.53	503.07	289
	Karatay	38.57	12161.5	1774.87	79
	Sarayönü Arkaplan	82.31	667.59	219.55	238

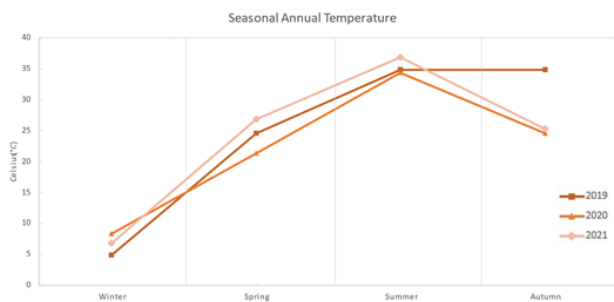


Figure 5. Annual urban heat island situation depending on the seasons (2019-2021)

Due to the lack of data at some stations and for better spatial analysis, Sentinel-5P satellite images was used for carbon monoxide data. GEE was used to obtain carbon monoxide maps. Visualization of result products made use of QGIS. The relationship between the change in air quality and temperature during the 36-month period (2019 January - 2021 December) in the central districts of Konya is discussed (Figure 6).

When the annual carbon monoxide maps are examined, it is seen that the rate in the winter season is higher than in the summer season. One of the main reasons for this is the increase in fuel used for heating in the winter.

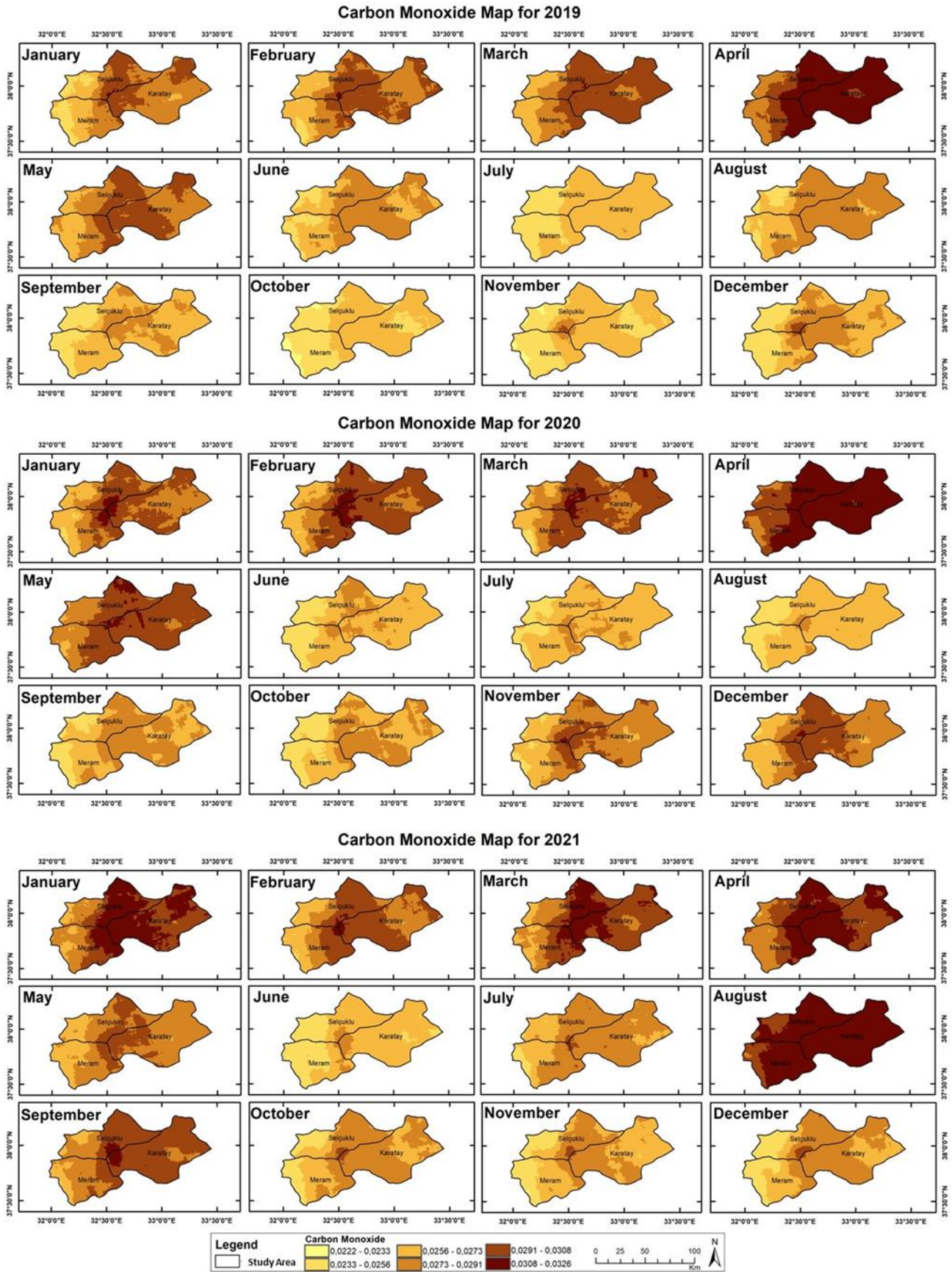


Figure 6. Carbon monoxide maps for 2019-2021

As a result of the combustion or incomplete combustion of the carbon in the structure of the natural gas, coal, or wood used, this gas comes out and spreads to the atmosphere. In addition, it is seen that the carbon monoxide density is higher in the city center on all maps. There is significant pollution in parts of the road network. The main reason for this is;

Gasoline is preferred in vehicles used for transportation purposes. Gasoline also has a carbon element in its chemical structure.

The carbon monoxide column densities obtained from the Sentinel-5P satellite belonging to the central districts of Konya between 2019-2021 are given in Figure 7. In the winter seasons of 2019 and 2021, it is seen that the densities are compatible with each other. As of April 2020, restrictions such as curfews have been introduced in our country to reduce the worldwide pandemic's impact. For this reason, the graph explains the decrease in carbon monoxide concentration in May compared to the previous year. In addition, the partial removal of restrictions as of June has increased the density. Again, the same factor was in question in 2021. In winter 2021, transportation was used sparingly because of the restriction's effect, which contributed to the decrease in carbon monoxide density. This density is higher in the summer of 2021 than in previous years. The main reason for this situation is that the restrictions have been reduced.

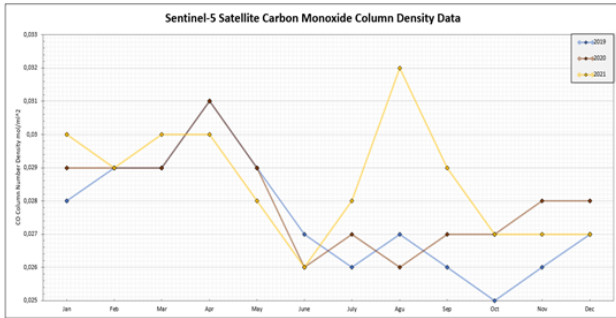


Figure 7. Sentinel-5 satellite carbon monoxide column number density

4 Conclusions

This study examined the urban heat island and carbon monoxide concentration in three central districts of Konya between 2019 and 2021. Based on the findings, the amount of heat and the increase in carbon monoxide in the city are directly proportional. This is because heat and carbon monoxide increased in the city center in 2021. This situation is also observed where transportation lines and residential areas are located. The most significant contributors to pollution in these areas are motor vehicles in traffic and home heating systems.

Additionally, when looked at seasonally, there were increases in pollutant levels in the summer of 2021 compared to the spring of 2019 and 2020. The impact of pollutants in the summer season is more significant on human health than in the winter. This is because pollutant gases from cars are found in the lower levels of the atmosphere in the summer months and disperse more slowly. In winter, pollutant gases

are dispersed to the upper levels of the atmosphere due to weather conditions (wind).

When examining the population of the study area, the most populous district is Selçuklu. The increase in air pollution in this area can be attributed, in part, to the population factor. There is no direct relationship between surface temperature and population. However, in densely populated areas, the presence of settlements, land use patterns, and urbanization can contribute to higher surface temperatures. Areas with extensive concrete structures and limited green spaces may experience the urban heat island effect, resulting in higher surface temperatures. This phenomenon can lead to hotter urban centers and relatively cooler regions in rural areas.

The amount of heat in cities also varies from region to region due to their geometric structure. An increase in heat also affects human health. Therefore, to reduce this effect in cities, reducing the concentration of carbon monoxide is necessary. Studies can be conducted to make the fuel used for heating purposes more environmentally friendly or to promote the use of environmentally friendly fuels in vehicles. Furthermore, if the NDVI index is used to determine the amount of heat, the density of green areas should be increased in areas with high heat effects or in city centers.

As a result, the size and density of the population, along with factors such as increased human activities and the resulting emissions of CO, can affect local air quality and pollutant levels. Additionally, surface temperature is closely related to urban development, land use patterns, and natural factors. Therefore, there is a proportional relationship between CO and surface temperature.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %5

References

- [1] Ş. Durak, Geleneksel kırsal konutların ekolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik bir model önerisi: Yalova örneği. 2021. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [2] Ü.D. Yüksel and O. Yılmaz, Ankara kentinde kentsel isi adası etkisinin yaz aylarında uzaktan algılama ve meteorolojik gözlemlere dayalı olarak saptanması ve değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2008, 23(4). <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/75772>
- [3] T.R. Oke, The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1-24, 1982. https://www.patarnott.com/pdf/Oake1982_UHI.pdf
- [4] Ö. Akyürek, Termal uzaktan algılama görüntüleri ile yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi: Kocaeli örneği. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6(2), 377-390, 2020. <https://doi.org/10.21324/dacd.667594>
- [5] B. Esin and N.S. Partigöç, İklim Değişikliğine Uyum Sürecinde Kent Planlamasının Rolü. Resilience, 6(1),

- 127-143, 2022. <https://doi.org/10.32569/resilience.1026712>
- [6] R.C. Estoque and Y. Murayama, Monitoring surface urban heat island formation in a tropical mountain city using Landsat data (1987–2015). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 133, 18-29, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.09.008>
- [7] X. Zhang, R.C. Estoque and Y. Murayama, An urban heat island study in Nanchang City, China based on land surface temperature and social-ecological variables. *Sustainable cities and society*, 32, 557-568, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.005>
- [8] X. Zhang, R. C. Estoque, Y. Murayama and M. Ranagalage, Capturing urban heat island formation in a subtropical city of China based on Landsat images: implications for sustainable urban development. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(3), 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08890-w>
- [9] Turkish Statistical Institute <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dunya-Nufus-Gunu-2022-45552>, Accessed 07 December 2022.
- [10] M. Poumadere, C. Mays, S. Le Mer and R. Blong, The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. *Risk Analysis: an International Journal*, 25(6), 1483-1494, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694.x>
- [11] W. Zhou, G. Huang and M.L. Cadenasso, Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and urban planning*, 102(1), 54-63, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>
- [12] D. Duarte, Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental. *Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP*, 9, 88-107, 2001. <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v0i9p88-107>
- [13] C.R.D. Almeida, L. Furst, A. Gonçalves and A. C Teodoro, Remote Sensing Image-Based Analysis of the Urban Heat Island Effect in Bragança, Portugal. *Environments*, 9(8), 98, 2022. <https://doi.org/10.3390/environments9080098>
- [14] T. Mushore, J. Odindi and O. Mutanga, “Cool” Roofs as a Heat-Mitigation Measure in Urban Heat Islands: A Comparative Analysis Using Sentinel 2 and Landsat Data. *Remote Sensing*, 14(17), 4247, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14174247>
- [15] Y.J. Choe and J.H. Yom, Improving accuracy of land surface temperature prediction model based on deep-learning. *Spatial Information Research*, 28(3), 377-382, 2020. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00299-5>
- [16] C. Ketterer and A. Matzarakis, Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *International journal of biometeorology*, 59(9), 1299-1309, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0940-3>
- [17] O. Adeyeri, A. Akinsanola and K. Ishola, Investigating surface urban heat island characteristics over Abuja, Nigeria: Relationship between land surface temperature and multiple vegetation indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7, 57-68, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.005>
- [18] Ü. Güler and K. Kalkan, Sentinel-3 Verileri ile Aktif Yangın Tespiti ve Sentinel-2 Verileri ile Doğrulanması. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 3(2), 86-97, 2022. <https://doi.org/10.48123/rsgis.1095460>
- [19] Q. Zhao, L. Yu, X. Li, D. Peng, Y. Zhang and P. Gong, Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 3778, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13183778>
- [20] A. Midekisa, F. Holl, D. J. Savory, R. Andrade-Pacheco, P. W. Gething, A. Bennett and H. J. Sturrock, Mapping land cover change over continental Africa using Landsat and Google Earth Engine cloud computing. *PloS one*, 12(9), e0184926, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184926>
- [21] B. DeVries, C. Huang, J. Armston, W. Huang, J. W. Jones and M. W. Lang, Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111664, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111664>
- [22] R. Goldblatt, W. You, G. Hanson and A.K. Khandelwal, Detecting the boundaries of urban areas in india: A dataset for pixel-based image classification in google earth engine. *Remote Sensing*, 8(8), 634, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8080634>
- [23] J. Xiong, P. S. Thenkabail, J. C. Tilton, M. K. Gumma, P. Teluguntla, A. Oliphant and N. Gorelick, Nominal 30-m cropland extent map of continental Africa by integrating pixel-based and object-based algorithms using Sentinel-2 and Landsat-8 data on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 9(10), 1065, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9101065>
- [24] D. Arıkan and F. Yıldız, Investigation of Antalya forest fire's impact on air quality by satellite images using Google earth engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100922, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100922>
- [25] J.A. Sobrino, R. Oltra-Carrió, G. Sória, J. C. Jiménez-Muñoz, B. Franch, V. Hidalgo and M. Paganini, Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *International journal of remote sensing*, 34(9-10), 3177-3192, 2013. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716548>
- [26] S. Çobanyıldız, Konya'da şehirleşmenin sıcaklık ve yağış üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [27] Ş. Yaman and E.T. Görmüş, Orman Zararlılarının Verdiği Zararın Google Earth Engine Kullanılarak İzlenmesi. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 3(2), 139-149, 2022. <https://doi.org/10.48123/rsgis.1116907>
- [28] O.S. Yılmaz, M. S. Oruç, A. M. Ateş and F. Gülgen, Orman Yangın Şiddetinin Google Earth Engine ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanarak Analizi: Hatay-

- Belen Örneği. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(2), 1519-1532, 2021. <https://doi.org/10.21597/jist.817900>
- [29] N. You and J. Dong, Examining earliest identifiable timing of crops using all available Sentinel 1/2 imagery and Google Earth Engine. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 161, 109-123, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.001>
- [30] N. Aslan, Landsat uydu görüntülerinden kentsel ısı adalarının belirlenmesi: Batı Akdeniz Bölgesi örneği. 2016. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [31] Landsat Satellite 8 Information. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con, Accessed 07 December 2022.
- [32] R. Yunita, A. Wibowo and A. Rais. Urban Heat Island Mitigation Strategy based on Local Climate Zone Classification using Landsat 8 satellite imagery. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1039/1/012013>
- [33] S.S. Arifin, B. Hamzah, R. Mulyadi and A. R. Rasyid, Effects of Vegetation on Urban Heat Island Using Landsat 8 OLI/TIRS Imagery in Tropical Urban Climate, 10, 395-405, 2022. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100134>
- [34] C. Xu, G. Chen, Q. Huang, M. Su, Q. Rong, W. Yue and D. Haase, Can improving the spatial equity of urban green space mitigate the effect of urban heat islands? An empirical study. Science of The Total Environment, 841, 156687, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156687>
- [35] X. Yu, X. Guo and Z. Wu, Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. Remote sensing, 6(10), 9829-9852, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.001>
- [36] M. Jin, J. Li, C. Wang and R. Shang, A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat-8 data and a case study of an urban area in China. Remote sensing, 7(4), 4371-4390, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70404371>
- [37] A. Sekertekin, S.H. Kutoglu and S. Kaya, Evaluation of spatio-temporal variability in Land Surface Temperature: A case study of Zonguldak, Turkey. Environmental monitoring and assessment, 188(1), 1-15, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5032-2>
- [38] F. Wang, Z. Qin, C. Song, L. Tu, A. Karnieli and S. Zhao, An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. Remote sensing, 7(4), 4268-4289, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>
- [39] D. Arıkan and F. Yıldız, Türkiye’de COVID-19 döneminde NO2 emisyonunun analizi. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği, sayfa 6-9, Mersin, Türkiye, 12-14 Mayıs 2022.
- [40] N. Polat, Mardin ilinde uzun yıllar yer yüzey sıcaklığı değişiminin incelenmesi. Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 2(1), 10-15, 2020. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tuzal/issue/52699/649526>
- [41] J. Zhang, Y. Wang and Y. Li, A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. Computers & geosciences, 32(10), 1796-1805, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.001>
- [42] J.W. Rouse Jr, R. H. Haas, D. W. Deering, J. A. Schell and J. C. Harlan, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. 1974. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750020419/downloads/19750020419.pdf>
- [43] N. Çağlayan, Seralar için led lambalı aydınlatma otomasyon sisteminin tasarlanmasına ve uygulanmasına yönelik bir çalışma. 2013.
- [44] K.J. McCree, Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. Agricultural meteorology, 10, 443-453, 1972. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(72\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(72)90045-3)
- [45] National Air Quality Monitoring Network. <http://sim.csb.gov.tr/>, Accessed 09 December 2022.





Negatif olmayan matris faktörizasyonuna dayalı LncRNA-Hastalık ilişkisi tahmini LncRNA-Disease association prediction based on nonnegative matrix factorization

Ahmet Toprak^{1,*} 

¹ Selçuk Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Konya, Türkiye

Öz

Yapılan birçok biyolojik deneylerde lncRNA'nın çeşitli karmaşık insan hastalıklarının gelişimi ile yakından ilişkili olduğunu kanıtlanmıştır. Bu nedenle lncRNA ve hastalık arasındaki ilişkiyi bilmek sadece hastalık mekanizmasını anlamaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda hastalığın teşhisini, tedavisini ve prognozunu da kolaylaştırır. Fakat lncRNA ile hastalık arasındaki ilişkiyi biyolojik deneyler yoluyla belirlemek hem maliyetli hem de çok zaman gerektiren bir süreçtir. Bu sebeple birçok araştırmacı potansiyel lncRNA-hastalık ilişkilerini tahmin etmek için hesaplamalı yöntemler geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, fonksiyonel olarak benzer lncRNA'ların fenotipik olarak benzer hastalıklarla ilişki kurma eğiliminde olduğu varsayımına dayanarak, potansiyel lncRNA'ları tahmin etmek için NMF adı verilen bir hesaplama yöntemi öneriyoruz. Bu yöntem lncRNA ekspresyon benzerlik ağını, lncRNA kosinüs benzerlik ağını, hastalık semantik benzerlik ağını, hastalık kosinüs benzerlik ağını ve bilinen lncRNA-hastalık ilişkilendirme ağını entegre etmektedir. Yöntemimizin tahmin doğruluğunu göstermek için 5-katlı çapraz doğrulama ve birini dışarıda bırak çapraz doğrulama tekniklerini uyguladık ve ROC grafiklerini elde ettik. 5-katlı çapraz doğrulama için 0.7837 AUC değeri, birini dışarıda bırak çapraz doğrulama için 0.8551 AUC değeri hesaplandı. Sonuçlar NMF yönteminin güvenilir tahmin performansına sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: lncRNA, hastalık, lncRNA-hastalık ilişkisi, NMF

1 Giriş

Uzun kodlama yapmayan RNA'lar (lncRNA) 200 nükleotidden daha uzun bir uzunluğa sahip olup hücre döngüsü kontrolü, transkripsiyonel düzenleme, post-transkripsiyonel düzenleme ve kromatin modifikasyonu gibi çeşitli hücresel süreçlerde önemli düzenleyiciler olarak görev yapan bir RNA türüdür [1]. Anormal lncRNA ekspresyonu çok sayıda insan hastalığının başlamasına ve ilerlemesine neden olabilir [2]. Yapılan deneysel çalışmalarda lncRNA'ların mutasyonlarının ve düzensizliklerinin rahim ağzı kanseri [3], kolorektal kanser [4], yumurtalık kanseri [5], prostat kanseri [6] ve diyabet [7] dahil olmak üzere çeşitli hastalıklara neden olduğu açığa çıkmıştır. Örneğin lncRNA H19'un aşırı ekspresyonu meme kanseri hücrelerinin karsinogenezitesini arttırdığı

Abstract

Many biological experiments have proven that lncRNA is related to various complex human diseases. Therefore, knowing the lncRNA-disease relationships not only facilitates the diagnosis, treatment and prognosis of the disease helps to understand the disease mechanism. However, determining the lncRNA-disease relationships through biological experiments is both costly and time-consuming. For this reason, many researchers have suggested calculational methods to forecast potential relationships between lncRNAs and diseases. In this study, we suggest a computational method named NMF to forecast possible lncRNAs, based on the assumption that functionally similar lncRNAs tend to associate with phenotypically similar diseases. This method integrates the lncRNA expression similarity network, the lncRNA cosine similarity network, the disease semantic similarity network, the disease cosine similarity network, and the known lncRNA-disease relationship network. To demonstrate the prediction accuracy of our method, we applied 5-fold cross-validation and leave-out cross-validation techniques and obtained ROC plots. AUC of 0.7837 for 5-fold cross-validation and 0.8551 AUC for leave-out cross-validation were calculated. The results show that the NMF method has reliable prediction performance.

Keywords: lncRNA, disease, lncRNA-disease association, NMF

bilinmektedir [8]. Tümör baskılayıcı lncRNA GAS5'nin akciğer kanseri dokularında önemli ölçüde aşağı regüle edildiği [9] ve HULC'nin anormal ekspresyonu Hepatosellüler karsinom (HCC) ile ilişkili birkaç gende önemli anormalliklere neden olduğu görüşmüştür [10]. Bu sebeple lncRNA'lar ilgili kanserlerin erken teşhisi ve prognozu için biyobelirteç olarak kullanılabilir, bu da lncRNA'lar ve hastalıklar arasındaki ilişkilerin tanımlanmasını bir araştırma odağı haline getirmektedir. Hastalıkla ilişkili lncRNA'ların bulunması, lncRNA düzeyinde karsinogeneze sebep olan karmaşık mekanizmaların anlaşılmasına, hastalık teşhisi ve tedavisi için yeni prognostik belirteçlerin ortaya çıkarılması açısından hayati önem taşımaktadır. Yapılan deneysel çalışmalara rağmen doğrulanmış lncRNA-hastalık ilişkileri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: atoprak@selcuk.edu.tr (A. Toprak)

Geliş / Received: 07.04.2023 Kabul / Accepted: 10.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1279335

hala nispeten sınırlıdır. Bunun başlıca sebebi deneysel çalışmaların uzun süreç gerektirmesi ve artan maliyetleridir. Bu yüzden hastalıkla ilişkili lncRNA'ları bulmak için benzerlik tabanlı ve makine öğrenmesi tabanlı birçok hesaplamalı yöntemler geliştirilmiştir.

LncRNA ve hastalıklarla ilgili etkileşim bilgilerini barındıran Lnc2Cancer [11], MNDR [12] ve NRED [13] gibi çok sayıda açık kaynaklı veri tabanı bulunmaktadır. Lnc2Cancer veri tabanı lncRNA ile ilgili çok sayıda literatür ve biyomedikal deneysel verilerden 1614 insan lncRNA'sı ve 165 insan hastalığı arasında 4989 ilişki barındırmaktadır. Bu veri tabanları lncRNA ve hastalık arasındaki ilişkiyi incelemeye yardımcı olur.

Bu çalışmada, potansiyel insan lncRNA-hastalık ilişkilerini daha etkili bir şekilde tahmin etmek için negatif olmayan matris tamamlama (NMF) hesaplama yöntemini uyguladık. Bu yöntemde bilinen lncRNA-hastalık ilişkilerini, lncRNA ekspresyon benzerlik, hastalık benzerlik ve kosinüs benzerlik ağırları ile entegre ederek başarılı bir tahmin performansı elde ettik. NMF yönteminin tahmin performansını göstermek için beş katlı çapraz doğrulama (5-katlı CV) ve birini dışarıda bırak çapraz doğrulama (LOOCV) tekniklerini uyguladık. Önerilen NMF yöntemi ile ROC grafikleri hem 5-katlı CV hem de LOOCV için çizdirilmiş ve AUC değerleri hesaplanmıştır. 5-katlı CV tekniğinde 0.7837 AUC değeri, LOOCV tekniğinde ise 0.8551 AUC değeri elde edilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 İnsan lncRNA-Hastalık ilişkisi

Deneysel olarak doğrulanmış 369 lncRNA ve 246 hastalık arasındaki 687 deneysel olarak doğrulanmış lncRNA-hastalık ilişki verisi LncRNADisease [14] veri tabanından elde edilmiştir. Hastalık ontolojisi bilgisi olmayan hastalıkları [15] ve ArrayExpress'te ekspresyon profili olmayan lncRNA'ları filtreledik [16]. Sonuçta 115 lncRNA ve 178 hastalık içeren, deneysel olarak doğrulanmış 540 lncRNA-hastalık ilişki veri seti elde ettik. Komşuluk matrisi $A \in R^{nl \times nd}$ 'yi lncRNA ile hastalık arasındaki ilişkiyi temsil etmek için tanımladık; burada $A(i, j)$ lncRNA $l(i)$ ve hastalık $d(j)$ arasında bir ilişki olup olmadığını göstermektedir. lncRNA $l(i)$ ve hastalık $d(j)$ arasında bilinen bir ilişki var ise $A(i, j) = 1$, ilişki bilinmiyorsa $A(i, j) = 0$ yapılmıştır.

$$A(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{lncRNA } l(i) \text{'nin hastalık } d(j) \text{ ile ilişkisi yoksa} \\ 1 & \text{lncRNA } l(i) \text{'nin hastalık } d(j) \text{ ile ilişkisi varsa} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 LncRNA ekspresyon benzerliği

LncRNA ekspresyon profilleri Array-Express veri tabanından indirilmiştir [17]. Array-Express veri tabanı RNA-sekanslama teknolojisi ile üretilen 16 insan dokusundan 60.000'den fazla ifade profilini içermektedir. Her bir lncRNA çifti için Spearman korelasyon katsayısı lncRNA ekspresyon benzerliği olarak hesaplanır [18]. LncRNA $l(i)$ ve lncRNA $l(j)$ 'nin 0 ile 1 arasındaki

ekspresyon benzerlik skorunu temsil etmek için $LS(l_i, l_j)$ matrisi kullanılmıştır.

2.3 Hastalık Semantik benzerliği

Yönlendirilmiş döngüsüz grafik (DAG) hastalık semantik benzerliğini hesaplamak ve potansiyel lncRNA-hastalık ilişkilerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk olarak ABD Ulusal Tıp Kütüphanesinden (<https://meshb.nlm.nih.gov/>) hastalıkların MeSH tanımları elde edilir ve her bir hastalık için DAG $G_{d_i} = (d_i, T_{d_i}, E_{d_i})$ yapısı oluşturulur. DAG yapısında düğümler hastalık MeSH tanımlayıcılarını temsil eder ve tüm MeSH tanımlayıcıları ana düğümlerden alt düğümlere olan ilişkiyi temsil etmek için doğrudan bir kenar kullanır. T_{d_i} kendisi de dahil olmak üzere d_i hastalığının ata düğümünü, E_{d_i} ise d_i ile olan bağlantıları gösterir. Bu çalışmada hastalık semantik benzerliği [19, 20]'de anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Hastalık d_i ile ata hastalığı p arasındaki hastalık semantik benzerliği Denklem (2) ve Denklem (3) ile hesaplanır:

$$d_i(p) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } p = d_i \\ \max(\Delta \times D_{d_i}(p') | p' \in p \text{'nin alt hastalığı}) & \text{eğer } p \neq d_i \end{cases} \quad (2)$$

$$DV(d_i) = \sum_{p \in T_{d_i}} D_{d_i}(p) \quad (3)$$

Burada $D_{d_i}(p)$ ve $D_{d_j}(p)$ sırasıyla hastalık d_i ve hastalık d_j 'nin semantik değerini göstermektedir. Hastalık d_i ve hastalık d_j arasındaki semantik benzerlik Denklem (4) ile hesaplanır:

$$DS(d_i, d_j) = \frac{\sum_{p \in T(d_i) \cap T(d_j)} (D_{d_i}(p) + D_{d_j}(p))}{DV(d_i) + DV(d_j)} \quad (4)$$

2.4 LncRNA'lar ve hastalıkları için kosinüs benzerliği

LncRNA kosinüs benzerliği ilkesi eğer lncRNA l_i ve lncRNA l_j birbirine benzerse o zaman lncRNA-hastalık ilişki matrisinde ikili vektör $IP(l_i)$ ve ikili vektör $IP(l_j)$ 'nin birbirine benzer olması gerektiği varsayımına dayanır. Her biri aynı varsayım hastalıklar için de geçerli olmalıdır. Bilinen lncRNA-hastalık ilişkilendirme verilerine göre, lncRNA'ların kosinüs benzerlik matrisi Denklem (5) ve Denklem (6) ile hesaplanır:

$$CL = (CL(l_i, l_j))_{N_l \times N_l} \quad (5)$$

$$CL(l_i, l_j) = \frac{IP(l_i) \cdot IP(l_j)}{\|IP(l_i)\| \|IP(l_j)\|} \quad (6)$$

Burada $CL(l_i, l_j)$ lncRNA l_i ve lncRNA l_j arasındaki kosinüs benzerliğidir. İkili vektör $IP(l_i)$, lncRNA $l(i)$ ile her

bir hastalık (komşuluk matris A 'nın i 'inci sütunu) arasındaki ilişkinin varlığını veya yokluğunu gösterir.

Benzer şekilde, hastalık d_i ve hastalık d_j arasındaki kosinüs benzerliği **Denklem (7)** ve **Denklem (8)** ile hesaplanabilir:

$$CD = (CD(d_i, d_j))_{N_d \times N_d} \quad (7)$$

$$CD(d_i, d_j) = \frac{IP(d_i) \cdot IP(d_j)}{\|IP(d_i)\| \|IP(d_j)\|} \quad (8)$$

Burada $CD(d_i, d_j)$ hastalık d_i ve hastalık d_j arasındaki kosinüs benzerliğidir. İkili vektör $IP(d_i)$, hastalık $d(i)$ ile her bir lncRNA (komşuluk matris A 'nın i 'inci satırı) arasındaki ilişkinin varlığını veya yokluğunu gösterir.

2.5 LncRNA ve hastalık benzerliklerinin entegre edilmesi

Kapsamlı ve güvenilir bir lncRNA benzerlik matrisi elde etmek için lncRNA'nın kosinüs benzerlik matrisini ve lncRNA ekspresyon benzerlik matrisini entegre ettik. LncRNA l_i ve lncRNA l_j 'nin komşuluk matrisi A 'da ortak ilişkili hastalıkları yoksa, kosinüs benzerlik matrisi aralarındaki değer 0'dır. Bu nedenle, lncRNA l_i ve lncRNA l_j 'nin kosinüs benzerlik puanı olmadığında, entegre benzerlik puanı olarak doğrudan aralarındaki lncRNA ekspresyon benzerlik puanını kullanırız. LncRNA l_i ve lncRNA l_j 'nin kosinüs benzerlik matrisinde bir benzerlik puanı varsa, kosinüs benzerlik puanları ve ekspresyon benzerlik puanları nihai benzerlik puanı olarak entegre edilir. LncRNA entegre benzerlik puanları **Denklem (9)** ile hesaplanır.

$$= \begin{cases} \frac{IL(l_i, l_j)}{2} & \text{eğer } l_i \text{ ve } l_j \text{ ilişkili ise} \\ LS(l_i, l_j) & \text{değilse} \end{cases} \quad (9)$$

Benzer şekilde, hastalık semantik benzerlik matrisi ve hastalık kosinüs benzerlik matrisi entegre edilerek entegre hastalık benzerlik matrisi elde edilir. Hastalık d_i ve hastalık d_j 'nin komşuluk matrisi A 'da ortak ilişkili lncRNA'ları yoksa, kosinüs benzerlik matrisinde aralarındaki değer 0 olduğu için doğrudan hastalık semantik benzerliğini kullanırız. Hastalık kosinüs benzerlik matrisinde benzerlik puanı varsa, hastalık kosinüs benzerlik matrisi ve hastalık semantik benzerlik matrisindeki puanları entegre ederiz. Hastalık entegre benzerlik matrisi **Denklem (10)** ile hesaplanır:

$$= \begin{cases} \frac{ID(d_i, d_j)}{2} & \text{eğer } d_i \text{ ve } d_j \text{ ilişkili ise} \\ DS(d_i, d_j) & \text{değilse} \end{cases} \quad (10)$$

2.6 Negatif olmayan matris faktörizasyonu

Negatif olmayan matris faktörizasyonu (nonnegative matrix factorization-NMF) tahmin sistemlerinde uygulanabilen önemli bir algoritmadır [21]. Son yıllarda NMF ilaç-ilaç [22], lncRNA-protein [23], miRNA-hastalık [24], mikrop-hastalık [25], ilaç-hastalık [26] ve circRNA-hastalık [27] potansiyel etkileşimlerini tahmin etmek için başarıyla kullanılmıştır. NMF komşuluk matrisini doğrudan iki düşük boyutlu negatif olmayan matrise ayrıştırarak lncRNA-hastalık ilişkisi skor matrisini elde etmeyi amaçlamaktadır [28]. Bu çalışmada, lncRNA-hastalık ilişki matrisi $Y \in R^{468 \times 262}$, $U \in R^{k \times 468}$ ve $V \in R^{k \times 262}$ olmak üzere iki alt matrise ayrıştırılır, burada k ($k < rn/(r+n)$) alt uzay boyutunu temsil etmektedir. LncRNA-hastalık ilişki tahmini matematiksel ifadesi **Denklem (11)** ve **Denklem (12)** ile formüle edilmiştir:

$$Y \cong U^T V \quad (U \geq 0, V \geq 0) \quad (11)$$

Amaç fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$\min_{U, V} \|Y - U^T V\|_F^2 \quad (U \geq 0, V \geq 0) \quad (12)$$

Burada $\|\cdot\|_F$ Frobenius normu temsil etmektedir. $U, V \geq 0$ ise U ve V 'nin tüm öğelerinin negatif olmadığını gösterir. $\|U\|_F^2 = Tr(U^T U)$, $Tr(U^T) = Tr(U)$ ve $Tr(UV) = Tr(VU)$ matris özelliklerine göre **Denklem (13)**'ü elde edebiliriz.

$$\begin{aligned} \|Y - U^T V\|_F^2 &= Tr((Y - U^T V)(Y - U^T V)^T) \\ &= Tr(Y Y^T) - 2Tr(Y V^T U) \\ &\quad + Tr(U^T V V^T U) \end{aligned} \quad (13)$$

Lee ve arkadaşları [28] U ve V 'nin çarpımsal güncelleme kurallarına dayanan, negatif olmayan matris çarpanlara ayırma algoritmasını önermişlerdir. **Denklem (13)**'ün güncelleme kuralları **Denklem (14)** ve **Denklem (15)**'deki gibidir:

$$u_{ki} \leftarrow u_{ki} \frac{(V Y^T)_{ki}}{(V V^T U)_{ki}} \quad (14)$$

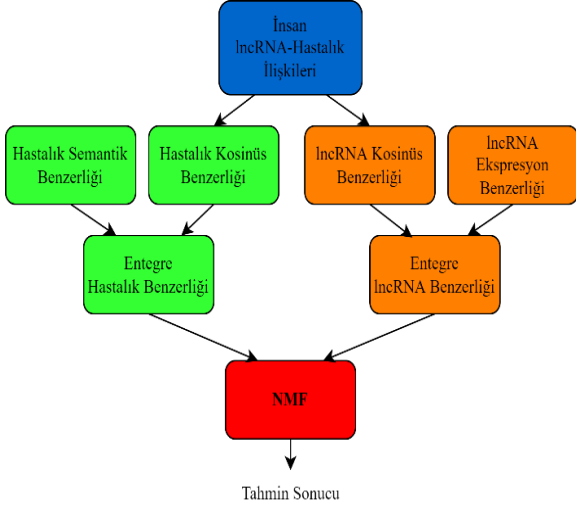
$$v_{kj} \leftarrow v_{kj} \frac{(U Y^T)_{kj}}{(U U^T V)_{kj}} \quad (15)$$

Denklem (14) ve **Denklem (15)** ile U ve V matrisleri yakınsayana kadar güncellenir. LncRNA-hastalık çiftleri için tahmin edilen ilişkilendirme skoru matrisi $Y = U^T V$ ile elde edilir. Sonuç olarak lncRNA-hastalık çifti puanı ne kadar yüksekse ilişkili olma olasılıkları o kadar yüksektir. Uygulamış olduğumuz NMF yönteminin akış diyagramı **Şekil 1**'de görülmektedir.

3 Performans hesaplaması

Bu çalışmada, NMF'nin lncRNA-hastalık etkileşimlerini tahmin etme performansını değerlendirmek için beş katlı çapraz doğrulama ve LOOCV teknikleri uyguladık. Beş katlı

çapraz doğrulamada bilinen 540 lncRNA-hastalık ilişki veri setini rastgele beş eşit alt kümeye ayırdık. Dördü eğitim seti olarak kullanılır ve geri kalan bir alt küme test örneği olarak kullanılmıştır. LOOCV tekniğinde ise bilinen 540 lncRNA-hastalık ilişki veri setinin her biri test örneği olarak kullanılırken diğerleri eğitim seti olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. NMF yönteminin akış diyagramı

ROC (alıcı işlem karakteristiği) eğrisi ve AUC (alıcı işlem karakteristiği eğrisinin altındaki alan) değeri makine öğrenmesinde performans tahmini için yaygın olarak kullanılır [29]. ROC eğrisi gerçek pozitif oranı TPR (*Sensitivity*) karşılık yanlış pozitif oranı FPR ($1 - Specificity$) çizdirilerek elde edilir. ROC eğrisini çizdirebilmek için oluşturulan karışıklık matrisi ile duyarlılık (*Sensitivity*) ve özgüllük (*Specificity*) Denklem (16) ve Denklem (17) ile hesaplanır:

$$TPR(Sensitivity) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (16)$$

$$FPR(1 - Specificity) = \frac{TN}{TN + FP} \quad (17)$$

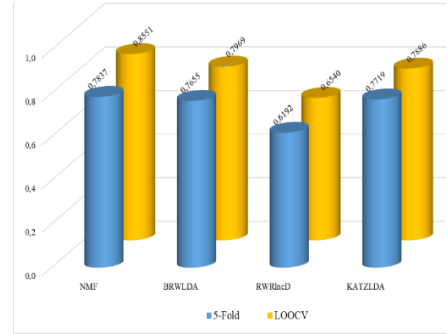
Burada, TP gerçek pozitif, FN yanlış negatif, TN gerçek negatif ve FP yanlış pozitif tahmin sayısını göstermektedir.

AUC değeri ise ROC eğrisinin altında kalan hesaplanarak elde edilir. AUC değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Büyük bir AUC değeri modelin daha iyi tahmin performansını temsil etmektedir.

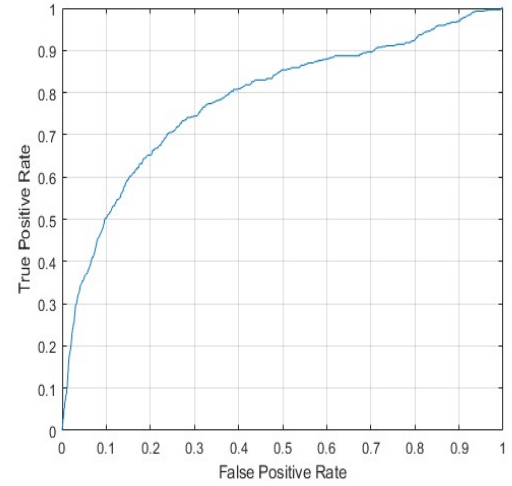
NMF yönteminin ROC eğrileri Şekil 3 ve Şekil 4'te görülmektedir. Yöntemin 5-katlı CV tekniğinde hesaplanan AUC değeri 0.7837, LOOCV tekniğinde hesaplanan AUC değeri ise 0.8551'dir. Hesapladığımız AUC değerlerini bizden önce yapılmış ve aynı veri tabanını kullanan çalışmalar ile Tablo 1'de ve Şekil 2'de görüldüğü gibi karşılaştırdık. Sonuçlar incelendiğinde NMF yönteminin muhtemel lncRNA'lar ve hastalıklar arasındaki ilişkileri belirlemede kullanılabileceği görülmüştür.

Tablo 1. NMF yöntemi ve diğer yöntemlerin karşılaştırmalı AUC değerleri

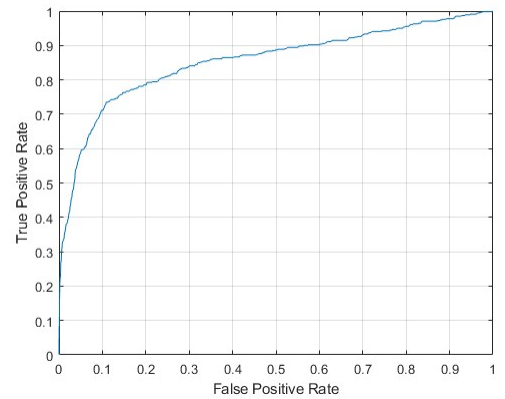
	5-Fold	LOOCV
NMF	0.7837	0.8551
BRWLDA [30]	0.7655	0.7969
RWRlncD [31]	0.6192	0.6540
KATZLDA [32]	0.7719	0.7886



Şekil 2. AUC değerlerinin karşılaştırmalı grafiği



Şekil 3. 5-fold CV ROC



Şekil 4. LOOCV ROC

4 Sonuç ve tartışma

Çok sayıda biyolojik deney ve klinik çalışma lncRNA'nın birçok karmaşık insan hastalığının gelişiminde hayati bir rol oynadığını göstermiştir. Bu nedenle potansiyel lncRNA-hastalık ilişkilerini tahmin etmek önemlidir. Bu tahmin yalnızca hastalığın arkasındaki temelleri anlamaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda hastalığın prognozuna ve önlenmesine de katkıda bulunur. Bununla birlikte biyolojik deneyler ve klinik çalışmalar yoluyla ilişkilendirmelerin doğrulanması zaman alıcı ve pahalıdır. Bu çalışmada potansiyel lncRNA-hastalık ilişkilerini tahmin etmek için NMF hesaplama yöntemi öneriyoruz. Önermiş olduğumuz yöntem ile 5-katlı CV tekniğinde 0.7837 AUC değeri, LOOCV tekniğinde ise 0.8551 AUC değeri hesaplandı.

Diğer üç gelişmiş yöntemle karşılaştırıldığında NMF 5-katlı CV tekniğinde ve LOOCV tekniğinde daha iyi tahmin performansına sahiptir. NMF yönteminin başarılı tahmin performansı elde etmesinin sebeplerinden ilki NMF lncRNA kosinüs benzerliği ile lncRNA ekspresyon benzerliğini ve hastalık kosinüs benzerliği ile hastalık semantik benzerliğini bütünleştirir. İkincisi, NMF negatif örnekleri olmayan bir modeldir. Üçüncüsü, NMF bilinen herhangi bir ilişkili hastalık olmadan lncRNA'ları tahmin edebilir.

NMF yönteminin başarılı tahmin performansı olmasına rağmen, bazı sınırlamaları da vardır. Bilinen lncRNA-hastalık ilişki yoğunluğu nispeten azdır ve bu da tahmin sonuçlarının doğruluğu üzerinde belirli bir etkiye sahip olacaktır. Ayrıca, lncRNA kosinüs benzerlik ağı ve hastalık kosinüs benzerlik ağı büyük ölçüde bilinen lncRNA-hastalık ilişki ağına dayanır. Bu durum daha fazla bilinen ilişkili lncRNA'lara sahip hastalıklar ve daha fazla bilinen ilişkili hastalıklara sahip lncRNA'lar için tahmin yanlılığına yol açar. Tahmin yanlılığını azaltmak ve tahmin performansını iyileştirmek için gelecekte NMF yöntemine daha büyük bir lncRNA-hastalık ilişkilendirme ağı, hastalık fenotip benzerlik ağı ve lncRNA fonksiyonel benzerlik ağı gibi ek deneysel olarak doğrulanmış biyolojik veriler uygulanmalıdır. Ayrıntılı bir füzyon yöntemiyle daha fazla biyolojik bilgi uygulandığında tahmin doğruluğu geliştirilebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] Washietl, S., M. Kellis, and M. Garber, Evolutionary dynamics and tissue specificity of human long noncoding RNAs in six mammals. *Genome research*, 2014. 24(4): p. 616-628. DOI: <https://doi.org/10.1101/gr.165035.113>.
- [2] Schmitt, A.M. and H.Y. Chang, Long noncoding RNAs in cancer pathways. *Cancer cell*, 2016. 29(4): p. 452-463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccell.2016.03.010>.
- [3] Huang, H., et al., Upregulation of lncRNA PANDAR predicts poor prognosis and promotes cell proliferation in cervical cancer. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2017. 21(20): p. 4529-4535.
- [4] Zhu, Y., et al., Oncogenic activity of Wrap53 in human colorectal cancer in vitro and in nude mouse xenografts. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 2018. 24: p. 6129. DOI: <https://doi.org/10.12659/MSM.910214>.
- [5] Tripathi, M.K., et al., Role of lncRNAs in ovarian cancer: defining new biomarkers for therapeutic purposes. *Drug Discovery Today*, 2018. 23(9): p. 1635-1643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2018.04.010>.
- [6] Sun, S.-C., et al., Expression of long non-coding RNA H19 in prostate cancer and its effect on the proliferation and glycometabolism of human prostate cancer cells. *Zhonghua nan ke xue= National Journal of Andrology*, 2017. 23(2): p. 120-124.
- [7] Thomas, A.A., et al., lncRNA H19 prevents endothelial-mesenchymal transition in diabetic retinopathy. *Diabetologia*, 2019. 62: p. 517-530. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00125-018-4797-6>.
- [8] Collette, J., X. Le Bourhis, and E. Adriaenssens, Regulation of human breast cancer by the long non-coding RNA H19. *International journal of molecular sciences*, 2017. 18(11): p. 2319. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms18112319>.
- [9] Iacoangeli, A., et al., BC200 RNA in invasive and preinvasive breast cancer. *Carcinogenesis*, 2004. 25(11): p. 2125-2133. DOI: <https://doi.org/10.1093/carcin/bgh228>.
- [10] Pasmant, E., et al., Characterization of a germ-line deletion, including the entire INK4/ARF locus, in a melanoma-neural system tumor family: identification of ANRIL, an antisense noncoding RNA whose expression coclusters with ARF. *Cancer research*, 2007. 67(8): p. 3963-3969. DOI: <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-06-2004>.
- [11] Gao, Y., et al., Lnc2Cancer 3.0: an updated resource for experimentally supported lncRNA/circRNA cancer associations and web tools based on RNA-seq and scRNA-seq data. *Nucleic acids research*, 2021. 49(D1): p. D1251-D1258. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkaa1006>.
- [12] Cui, T., et al., MNDR v2. 0: an updated resource of ncRNA-disease associations in mammals. *Nucleic acids research*, 2018. 46(D1): p. D371-D374. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1025>.
- [13] Dinger, M.E., et al., NRED: a database of long noncoding RNA expression. *Nucleic acids research*, 2009. 37(suppl_1): p. D122-D126. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkn617>.
- [14] Chen, G., et al., LncRNADisease: a database for long-non-coding RNA-associated diseases. *Nucleic acids research*, 2012. 41(D1): p. D983-D986. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gks1099>.
- [15] Zhang, X., et al., Long non-coding RNA expression profiles predict clinical phenotypes in glioma.

- Neurobiology of disease, 2012. 48(1): p. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2012.06.004>.
- [16] Schriml, L.M., et al., Disease Ontology: a backbone for disease semantic integration. *Nucleic acids research*, 2012. 40(D1): p. D940-D946. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkr972>.
- [17] Parkinson, H., et al., ArrayExpress—a public database of microarray experiments and gene expression profiles. *Nucleic Acids Research*, 2006. 35(suppl_1): p. D747-D750. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkl995>.
- [18] Chen, X. and G.-Y. Yan, Novel human lncRNA–disease association inference based on lncRNA expression profiles. *Bioinformatics*, 2013. 29(20): p. 2617-2624. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt426>.
- [19] Toprak, A. and E. Eryilmaz, Prediction of miRNA-disease associations based on Weighted K-Nearest known neighbors and network consistency projection. *Journal of Bioinformatics and Computational Biology*, 2021. 19(1): p. 2050041. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219720020500419>.
- [20] Toprak, A. and E. Eryilmaz Dogan, Prediction of Potential MicroRNA-Disease Association Using Kernelized Bayesian Matrix Factorization. *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 2021. 13(4): p. 595-602. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12539-021-00469-w>.
- [21] Luo, X., et al., An efficient non-negative matrix-factorization-based approach to collaborative filtering for recommender systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014. 10(2): p. 1273-1284. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2308433>.
- [22] Zhang, W., et al., Manifold regularized matrix factorization for drug-drug interaction prediction. *Journal of biomedical informatics*, 2018. 88: p. 90-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2018.11.005>.
- [23] Zhang, T., et al., LPGNMF: predicting long non-coding RNA and protein interaction using graph regularized nonnegative matrix factorization. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics*, 2018. 17(1): p. 189-197. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCBB.2018.2861009>.
- [24] Xiao, Q., et al., A graph regularized non-negative matrix factorization method for identifying microRNA-disease associations. *Bioinformatics*, 2018. 34(2): p. 239-248. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx545>.
- [25] Liu, Y., S.-L. Wang, and J.-F. Zhang, Prediction of microbe–disease associations by graph regularized non-negative matrix factorization. *Journal of Computational Biology*, 2018. 25(12): p. 1385-1394. DOI: <https://doi.org/10.1089/cmb.2018.0072>.
- [26] Zhang, W., et al., Predicting drug-disease associations by using similarity constrained matrix factorization. *BMC bioinformatics*, 2018. 19: p. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2220-4>.
- [27] Wei, H. and B. Liu, iCircDA-MF: identification of circRNA-disease associations based on matrix factorization. *Briefings in bioinformatics*, 2020. 21(4): p. 1356-1367. DOI: <https://doi.org/10.1093/bib/bbz057>.
- [28] Lee, D.D. and H.S. Seung, Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. *Nature*, 1999. 401(6755): p. 788-791. DOI: <https://doi.org/10.1038/44565>.
- [29] Fawcett, T., An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2006. 27(8): p. 861-874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.
- [30] Yu, G., et al., BRWLDA: bi-random walks for predicting lncRNA-disease associations. *Oncotarget*, 2017. 8(36): p. 60429. DOI: <https://doi.org/10.18632/oncotarget.19588>.
- [31] Sun, J., et al., Inferring novel lncRNA–disease associations based on a random walk model of a lncRNA functional similarity network. *Molecular BioSystems*, 2014. 10(8): p. 2074-2081. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3mb70608g>.
- [32] Chen, X., KATZLDA: KATZ measure for the lncRNA-disease association prediction. *Scientific Reports*, 2015. 5: p. 16840. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep16840>.





Balıkesir ili ve çevresinin kinematik özelliklerine bağlı gerilme ve deformasyon alanlarının modellenmesi

Modeling of the stress and strain fields depending on the kinematic properties of Balıkesir province and its vicinity

Nazlı Ceyla Anadolu Kılıç^{1,*} 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Bilim Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 50300, Nevşehir Türkiye

Öz

Yapılan çalışmada Balıkesir ili ve çevresinin depremselliği (38.50°-40.50°K-26.00°-29.00°D) Coulomb Kırılma Kriteri esaslarına göre değerlendirilmiştir. Bunun için öncelikle çalışma alanının hakim gerilme rejimi belirlenmiştir. Coulomb modellemeleri ise hem belirlenen depremler için hem de çalışma alanının tamamı için yapılmıştır. Böylelikle depremlerin birbiri ile olan gerilme etkileşimleri incelenmiş, güncel gerilme dağılımları belirlenmiş ve deprem tehlikesi olan alt alanlar tanımlanmaya çalışılmıştır. Coulomb modellemeleri için kullanılan deprem veri seti, çalışma alanı içerisinde 1900-2022 yılları arasında meydana gelen 65 adet depreme ait odak mekanizması çözümlerinden oluşmaktadır. Gerilme dağılımının çalışma alanının güncel deprem aktivitesi ile birlikte değerlendirilebilmesi için de homojen bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Derinliğin çalışma alanının depremselliği üzerindeki etkisi ise farklı derinlik değerlerine göre yapılan Coulomb modellemeleri ile belirlenmiştir. $3.1 \leq M_w \leq 4.0$ olan depremlerin sıklıkla görüldüğü çalışma alanında transtansiyonel tektonik rejim hakimdir. 1953 Yenice-Gönen Depremi ile birlikte depremselliğin net bir şekilde değiştiği Balıkesir ili ve çevresi için Bandırma-Yenice hattının dikkat çeken depremselliğe sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Coulomb gerilme analizi, Depremsellik, Kinematik özellikler, Gerilme, Balıkesir

1 Giriş

Yer ve zaman başta olmak üzere çok fazla bilinmezliğe sahip olması nedeniyle deprem kestirimi ile ilgili yapılan çalışmalar, herhangi bir alanda gelecekte meydana gelmesi muhtemel bir depreme ait yer, zaman ve magnitüd bilgilerinin literatürde kabul edilen yaklaşımlar ve yöntemler aracılığı ile olabildiğince gerçeğe yakın olacak şekilde belirlenmesine yönelik olarak yürütülmektedir. Deprem oluşum aşamalarının özelliklerine ve fay üzerindeki hareketle ilgili olarak oluşan gerilme durumu ve dağılımının belirlenmesi dolayısıyla ile de deprem potansiyeline sahip alt alanların tespiti deprem kestirimi çalışmalarının en önemli aşamalarından birisini oluşturmaktadır. Gerilme durumu ve dağılımlarının belirlenip incelenmesindeki amaç; yoğun deprem hareketliliklerinin yaşandığı aktif tektonik

Abstract

In the study, the seismicity of Balıkesir province and its vicinity (38.50°-40.50°N-26.00°-29.00°E) was evaluated according to the principles of the Coulomb Failure Criterion. For this, the dominant stress regime of the study area was initially determined. Coulomb models were made for both the identified earthquakes and the whole study area. In this way, the stress interactions of earthquakes were analysed, current stress distributions were determined, and subregions where the hazard of an earthquake was tried to be defined. The earthquake data set used for the evaluations consists of 65 earthquakes focal mechanism solutions that occurred between 1900 and 2022. The Coulomb stress distribution generated for the whole study area was evaluated together with the current seismicity of the study area. For this, a homogeneous earthquake catalog was created. The Coulomb stress models were created at various depths in order to determine the variation of stress with depth, too. The transtensional tectonic regime is dominant in the study area, where earthquakes with $3.1 \leq M_w \leq 4.0$ are frequently seen. It is seen that the Bandırma-Yenice line has remarkable seismicity for Balıkesir province and its vicinity, where the seismicity has clearly changed with the 1953 Yenice-Gönen Earthquake.

Keywords: Coulomb stress analysis, Seismicity, Kinematic properties, Stress, Balıkesir

bölgelerde meydana gelen depremlerin birbiri ile olan ilişkilerini fiziksel ve matematiksel olarak tanımlamak ve dolayısıyla gelecekte meydana gelmesi muhtemel deprem ve/veya depremler hakkında değerlendirmelerde bulunabilmektir. Faylanma ya da deprem olayının açıklanması dolayısıyla ile gerilme ve deformasyon alanlarının belirlenebilmesi için literatürde;

- ✓ Griffith Kırılma Kriteri
- ✓ Mohr Kırılma Kriteri
- ✓ Coulomb Kırılma Kriteri

olmak üzere üç farklı kriter bulunmaktadır.

Literatürde kabul edilen her üç kriterin de birbiri ile kesiştiği ve ayrıldığı noktalar bulunmaktadır. Örneğin; kırılma kriterlerinin en eskisi olarak kabul edilen Griffith Kırılma Kriteri, Mohr Kırılma Kriterinin parabolik hali

olarak tanımlanabilirken Mohr Kırılma Kriterinin Coulomb Kırılma Kriterine eşit olduğu durumlar olabilmekte ve bu nedenle de bazı araştırmacılar tarafından Mohr-Coulomb Kırılma Kriteri olarak tek bir kriter olarak değerlendirilebilmektedir.

Coulomb Kırılma Kriteri gösterdiği başarılı uygulamalar nedeni ile diğer kırılma kriterlerine göre ön plana çıkmış ve sonuç olarak yer kabuğunda meydana gelen kırıkları mühendislik açısından kabul edilebilir bir şekilde tanımlayabildiği kabul edilmiştir [1-3]. İlerleyen çalışmalar sayesinde Coulomb Kırılma Kriterinin, gerilme alanının incelenerek meydana gelen büyük bir depremin etrafındaki faylar üzerinde meydana getirdiği değişikliğin belirlenmesinde ve deprem meydana gelme olasılığı artan ve/veya azalan alanların tespit edilmesinde güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür [4-10]. Coulomb Kırılma Kriteri kullanılarak yapılan bir diğer çalışma ise meydana gelen ilk depremin yarattığı gerilme büyüklüğü esas alınarak bir depremin diğer bir depremi tetikleyip tetiklemediğinin ve/veya normal oluş zamanından öne çekip çekemediğinin araştırılması yönünde olmuştur [4, 7, 8, 10, 11-16]. Tüm bu çalışmalar ışığında Coulomb Kırılma Kriterinin deprem süreçlerinin analiz edilebilmesinde güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Sonuç olarak; literatürde Coulomb Kırılma Kriteri herhangi bir bölgedeki gerilme alan/alanlarının belirlenmesinde kullanılan etkin ve güvenilir yöntemlerden biri olarak kabul edilmekte ve bu nedenle de deprem kestirimi çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmada ise, başta coğrafi konumu ve tektonik yapısı olmak üzere sosyo-ekonomik ve sosyo-kültürel özellikleri ve demografik koşulları nedeni ile Türkiye için önemli bir yere sahip olan Balıkesir ili ve çevresinde Coulomb Kırılma Kriteri kullanılarak gerilme ve deformasyon analizi yapılmıştır. Böylelikle Balıkesir ili ve çevresinde meydana gelen depremlerin oluşumlarını kontrol eden gerilme durumları incelenmiş, geçmişte meydana gelen depremler arasında herhangi bir gerilme etkileşimi olup olmadığı belirlenmiştir. İleriye yönelik olarak fay parçalarının hareket mekanizmaları ve deprem hareketliliğinin yaşanması mümkün olan alt alanlar ile ilgili sorulara cevap/cevaplar aranmıştır.

2 Materyal ve metot

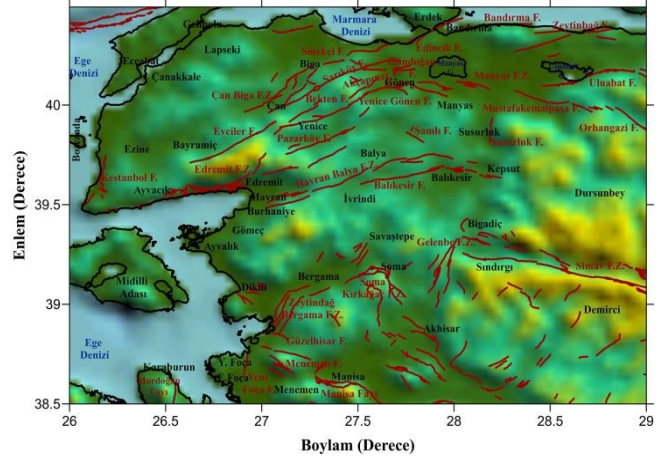
2.1 Tektonik yapı ve deprem hareketliliğinin incelenmesi

Coğrafi açıdan 39.20°-40.30° Kuzey Enlem ve 26.30°-28.30° Doğu Boylam sınırları içerisinde yer alan Balıkesir; doğuda Bursa ve Kütahya, güneyde Manisa ve İzmir ile batıda Çanakkale ile komşudur.

Batıdan Çanakkale Boğazı ve Ege Denizi'ne; kuzeyden ise İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi'ne kıyısı bulunan Balıkesir'in yüzölçümünün büyük bir kısmı Güney Marmara'da yer almakla birlikte hem Marmara hem de Ege Bölgesi'nde toprakları bulunmaktadır [17].

Tektonik açıdan Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Ege Graben Sistemi arasında geçiş bölgesinde yer alan Balıkesir, kuzey-kuzeybatıda Biga-Çan Fay Zonu, Mustafakemalpaşa, Karacabey, doğu-güneydoğuda Eskişehir-Kütahya Fay Zonları, güneyde Manisa-İzmir, batıda ise Midilli-Ege

Denizi Fay Zonları ile çevrili durumdadır [18,19]. Bu fay sistemleri dışında Balıkesir, Balıkesir Fayı, Bandırma Fayı, Edincik Fayı, Gündoğan Fayı, Edremit Fay Zonu, Havran-Balya Fay Zonu, Manyas Fay Zonu, Sarıköy Fay Zonu ve Yenice-Gönen Fay Zonu'nun da etkisi altındadır (Şekil 1).



Şekil 1. Balıkesir İli ve çevresine ait basitleştirilmiş tektonik harita [20-22]'den düzenlenerek yeniden çizilmiştir

Şekil 1'de görüldüğü üzere Balıkesir'in iki ayrı neotektonik yapı ile farklı fay sistemlerinin etkisi altında olması ve aynı zamanda da Ege Denizi ile Marmara Denizi'ne kıyısının bulunması il ve yakın çevresini jeofiziksel kökenli doğa olayları için oldukça uygun bir yerleşim yeri haline getirmiştir. Sahip olduğu coğrafi ve tektonik özelliklerin bir doğal sonucu olarak Balıkesir hem tarihsel hem de aletsel dönemde farklı mekanizmalara ve özelliklere sahip yer hareketlerinin ve tsunamilerin görüldüğü önemli bir sismotektonik bölge olarak ön plana çıkmaktadır.

Tarihsel dönem deprem verileri incelendiğinde Balıkesir'de etki yaratan depremlerin çoğunlukla Ayvalık, Bandırma, Edremit, Erdek ve Gönen ilçeleri ile Çanakkale-Midilli Adası-Ege Denizi, İznik ve çevresi, İzmir ve çevresi ile Bursa ve İstanbul'da meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca incelenen pek çok kaynakta yer hareketinin ardından rapor edilen tsunamilerin Bandırma, Edremit, Erdek ve Kapıdağ Yarımadası'nda etkili olduğu görülmektedir [23-38]. Ancak adı geçen bu alt alanların arkeolojik açıdan verimli yerleşim yerleri olması bu alt alanlar hakkında daha fazla bilgi sahibi olunmasına olanak vermektedir. Bu nedenle geçmiş deprem hareketliliği açısından bu alt alanlar, çalışma alanı içindeki diğer alt alanlar ile kıyaslanırken bu etkinin göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Aletsel dönem deprem verileri incelendiğinde ise Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Ege Graben Sistemi kaynaklı depremler dışında Ayvalık, Bigadiç, Erdek, Manyas ve Yenice-Gönen'de meydana gelen depremler ön plana çıkmaktadır. 1935 Erdek Depremleri, 1942 Bigadiç Depremi, 1944 Edremit Depremi, 1953 Yenice-Gönen Depremi, 1964 Manyas Depremi ve 1969 Gönen Depremi Balıkesir ili ve çevresinde aletsel dönemde meydana gelen önemli depremlerden bazılarıdır. Bu depremler dışında ise başta 1919 Soma Depremi, 1939 Dikili Depremi, 1949

Karaburun Depremi olmak üzere Balıkesir ili ve çevresinin Ege Denizi, Çanakkale, İzmir ve Manisa'da meydana gelen depremlerden de etkilendiği görülmektedir [27, 39].

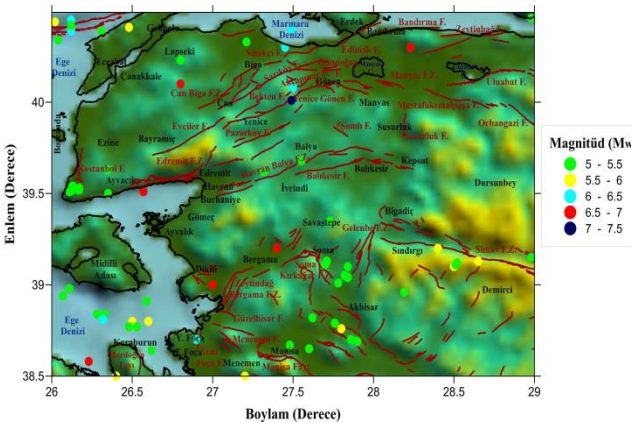
Tarihsel ve aletsel dönem deprem verilerinden hareketle geçmişte olduğu gibi gelecekte de Balıkesir ili ve çevresinin önemli deprem hareketliliklerine ev sahipliği yapabileceğini söylemek mümkündür.

Tektonik yapısı ve geçmiş deprem hareketliliğinin yanı sıra Balıkesir ili ve çevresini depremsellik açısından önemli kılan bir diğer özellik ise sismik boşluk kavramıdır. Literatürde benzer alanları kapsayan çalışmalar incelendiğinde, deprem oluşumu bakımından suskunluk gösteren sismik boşluk alanların varlığından bahsedildiği görülmektedir [39, 40-42].

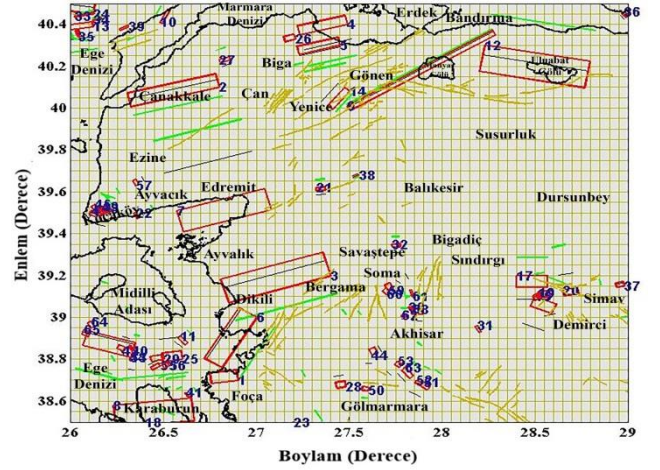
Sonuç olarak çalışma alanında deprem kestirimi için gerekli modellemelerin ve/veya parametrelerin güvenilir yöntemlerle belirlenip güncelliğinin sağlanması hayati önem taşımaktadır.

Coulomb gerilme analizi çalışmalarından elde edilen gerilme ve deformasyon değişimlerinin güvenilirliği ise hesaplamalarda kullanılan depremlerin çalışma alanının depremselliğini yansıtacak nicelik-nitelikte olması ve bu depremlere ait kaynak parametrelerinin güvenilirliği ile ilişkilidir. Böylelikle çalışma alanının bilinen deprem geçmişine ait veriler kullanılarak çalışma alanının tektonik yapısı ile uyumlu sonuçlar elde edilerek ileride deprem meydana gelmesi muhtemel alt alanlar hakkında değerlendirmelerde bulunmak mümkün olabilmektedir.

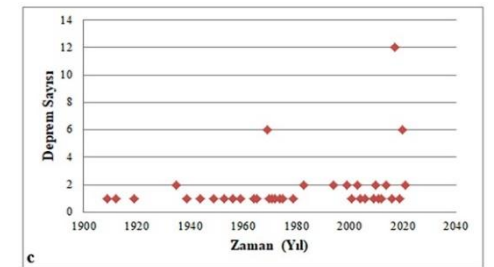
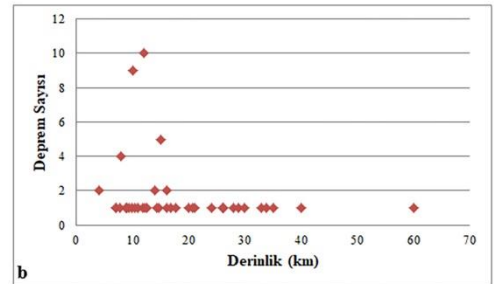
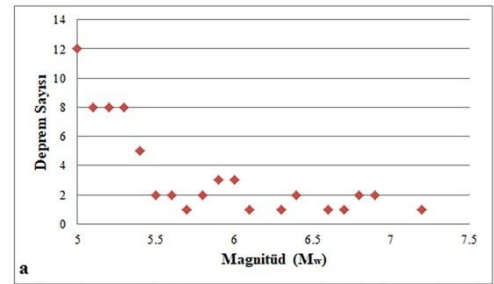
Depremsellik çalışmalarında katalogdaki depremlerin magnitüd hatalarından kaçınabilmek için mümkün olan en büyük zaman aralığı seçimi tercih sebebi olmaktadır [43-46]. Coulomb Kırılma Kriteri kullanılarak yapılan çalışmalarda ise hem geniş zaman aralığında meydana gelen depremlerin hem de tek bir depremin (ana şokun) oluşturduğu gerilme dağılımlarını belirlemek mümkündür [47-52]. Yapılan bu çalışmada ise çalışma alanının güncel gerilme durumunun da belirlenebilmesi için deprem veri seti hazırlanırken mümkün olabilen en geniş zaman aralığı ile bu zaman aralığı içerisinde önemli gerilme ve deformasyon alanları yaratabilecek büyüklükte minimum bir magnitüd değeri belirlenmesine dikkat edilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan depremlerin episantır dağılım haritası



Şekil 3. Çalışmada kullanılan depremlerin fay modelleri



Şekil 4. Çalışmada kullanılan depremlerin a- magnitüd b- derinlik c- yıllara göre dağılımları

Bu kapsamda Balıkesir ili ve çevresinde (38.50°-40.50°K-26.00°-29.00°D) 1900-2022 yılları arasında meydana gelen $M_w \geq 5.0$ olan önemli depremlere ait kaynak parametreleri çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalardan ve ulusal/uluslararası kataloglardan elde edilmiştir [33, 53-65].

Elde edilen deprem verilerinin episantır (Şekil 2) ve fay modelleri dağılımları (Şekil 3) harita üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 2 ve Şekil 3’de çalışma alanı içerisinde dağılımları görülen depremlerin özelliklerinin anlaşılabilmesi için depremlerin magnitüd dağılımı, derinlik dağılımı ve yıllara göre dağılımı sırası ile grafikler halinde verilmiştir (Şekil 4).

Şekil 4 çalışma alanı içerisinde $M_w=5.0$ büyüklüğündeki depremlerin hakim olduğunu ve odak derinliklerinin büyük bir çoğunluğunun ise 4.0-15 km arasında değiştiğini göstermektedir. Ayrıca çalışma alanında 2000 yılından itibaren deprem yoğunluğunun arttığı 1969, 2017 ve 2020 yıllarının ise deprem hareketliliği açısından oldukça aktif olduğu da görülmektedir.

Çalışmada kullanılacak depremler $M_w \geq 6.0$ ve $5.0 \leq M_w < 6.0$ olacak şekilde iki ayrı kategoride değerlendirildiğinde ise 2000 yılı öncesinde $M_w \geq 6.0$ büyüklüğünde 13 deprem olduğu buna karşılık 2000 yılı sonrasında sadece 1 tane $M_w \geq 6.0$ büyüklüğünde deprem meydana geldiği görülmektedir. Bu verilere göre 2000’li yılların başlangıcı ile birlikte $M_w \geq 6.0$ büyüklüğündeki depremlerin meydana gelme sıklığının oldukça azaldığı ayrıca 2000 yılı öncesinde ise $M_w \geq 6.0$ depremlerin oluş sıklığına karşılık $M_w \leq 6.0$ olan depremlerin meydana gelme sıklığının görece olarak daha seyrek olduğu görülmektedir. Bu durumu doğrudan çalışma alanının sahip olduğu deprem hareketliliği ile ilişkilendirmek yerine öncelikle görece olarak küçük magnitüdü depremlerin her daim kayıt altına alınmamış ve/veya alınmamış olması ile ilişkilendirmek sismoloji biliminin tarihsel gelişimi açısından daha uygun bir değerlendirme olacaktır. Bilindiği üzere aletsel sismolojik veriler 1900’lü yılların başında elde edilmeye başlanmış ancak hem deprem kayıt istasyonu sayılarının hem de kayıt yöntemlerinin yetersizliği nedeniyle günümüzdeki hassasiyete sahip olamamışlardır. Bu nedenle özellikle 1900-1960 yılları arasındaki deprem kataloglarının yetkinlikleri tartışmaya açık bir durumdur. Türkiye özelinde ise özellikle 17.08.1999 Gölcük Depremi’nden sonra elde edilen sismoloji ve mühendislik alanındaki gelişmeler göz önüne alındığında deprem kestirimi çalışmaları için yaklaşık olarak 100 yıllık bir süreçte küçük ve orta büyüklükteki depremlerin kayıt altına alınmamış olabileceğinin göz önüne alınması gerekmektedir. Dolayısı ile depremsellik çalışmaları kullanılan deprem veri setlerinde bir takım eksikliklerin olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Coulomb gerilme dağılımlarını, çalışma alanının güncel depremselliği ve/veya depremsellik parametreleri üzerinden değerlendirmek de mümkündür [51,52, 66]. Bu kapsamda yapılan çalışmada, 1900-2022 yılları arasında çalışma alanında meydana gelen depremlere ($M \geq 3.0$) ait veriler Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-KRDAE) katalogundan alınmıştır. Farklı magnitüd ölçeklerinde (M_b , M_d , M_l , M_s , M_w) kaydedilen deprem verileri öncelikle “ M_w ” magnitüd ölçeğine dönüştürülmüştür. Depremsellik çalışmalarında “ M_w ” magnitüd ölçeği üst limitte doyuma uğramaması nedeni ile tercih nedenidir. Ancak yapılan çalışmada “ M_w ” magnitüd ölçeğinin seçiminde Şekil 2’de episantr dağılımları verilen deprem verilerinin “ M_w ” magnitüd ölçeğinde olmasının da etkisi bulunmaktadır. Böylelikle çalışmada kullanılan deprem verileri magnitüd değeri bakımından kıyaslanabilir niteliğe kavuşmuşlardır. “ M_w ” ölçeğinde homojen hale

getirilen katalogdan, ana şoka bağlı olarak gelişen olayların (öncü şok, artçı şok, deprem yığılımları ve deprem çiftleri) ZMAP 6.0 [67] paket programı kullanılarak Reasenberg algoritması [68] esaslarına göre uzaklaştırılması ile yeni bir katalog elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra elde edilen katalogda, deprem verilerinin küçükten büyüğe sıralı ve tam olup olmadığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Teoride kabul edilen bu ideal durum pratikte her daim yakalanamayacağı için deprem katalogunun belirlenecek bir magnitüd değerine göre tamamlanması yoluna gidilir. “ M_c ” olarak ifade edilen bu değer kullanılan katalogdaki en küçük magnitüd değeri, en çok deprem sayısına ait magnitüd değeri vb. olarak kabul edilebileceği gibi farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen esaslara göre de belirlenebilmektedir. Yapılan çalışmada “ M_c ” değeri Maximum Curvature (MAXC) [69] yöntemi esaslarına göre MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 [67] paket programı kullanılarak belirlenmiştir. Sonuç olarak da $M_c = 3.1$ olacak şekilde deprem kataloguna son hali verilmiştir.

2.2 Kinematik özelliklerin belirlenmesi

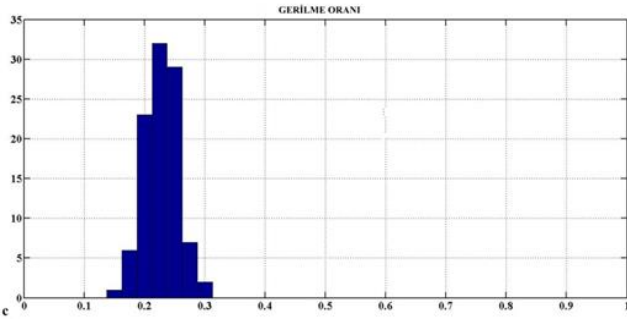
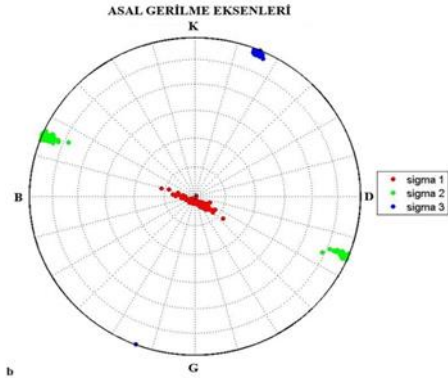
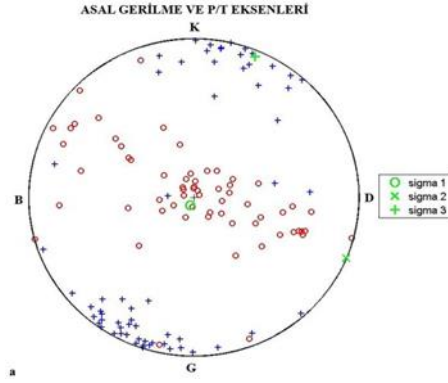
Herhangi bir alanda Coulomb gerilme analizinin yapılabilmesi için öncelikle o alana ait asal gerilme eksenlerinin doğrultularının, yönelimlerinin bir başka ifade ile azimut-dalım değerlerinin ve bölgesel gerilmenin belirlenmesi gerekmektedir. Gerekli bu verileri çalışma alanında ve/veya çalışma alanı ile benzer alanlarda yapılmış daha önceki çalışmalardan [70-73] derlemek ya da Coulomb gerilme analizi için hazırlanan deprem veri setini kullanarak özgün sonuçlar elde etmek mümkündür.

Yapılan çalışmada gerilme modeli, Coulomb gerilme analizinde olduğu gibi Şekil 2 ve Şekil 3’de dağılımları verilen depremler kullanılarak belirlenmiştir. Bu aşamada Vavrycuk [74] tarafından geliştirilen ters çözüm algoritmasına sahip MATLAB tabanlı STRESSINVERSE programı kullanılmıştır. Elde edilen verilerin bölgesel gerilme rejimi açısından değerlendirilmesinde de dalım açılarını esas alarak Zoback [75] tarafından geliştirilen sınıflama kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Dalım açılarına (d) göre bölgesel tektonik rejim türü sınıflaması

Bölgesel Tektonik Rejim Türü	P/ σ_1	B/ σ_2	T/ σ_3
Normal Fay	$d \geq 52^\circ$		$d \leq 35^\circ$
Normal-Doğrultu	$40^\circ \leq d < 52^\circ$		$d \leq 20^\circ$
Atımlı Fay	$d < 40^\circ$	$d \geq 45^\circ$	$d \leq 20^\circ$
Doğrultu Atımlı Fay	$d \leq 20^\circ$	$d \geq 45^\circ$	$d < 40^\circ$
Doğrultu Atımlı Fay	$d \leq 20^\circ$		$40^\circ \leq d < 52^\circ$
Ters-Doğrultu Atımlı	$d \leq 35^\circ$		$d \geq 52^\circ$
Fay			
Ters Fay			

Çalışma alanı için oluşturulan gerilme modelinin grafik gösterimleri ise Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Çalışmada kullanılacak depremlerin a- asal gerilme ve P/T eksenleri dağılımı b- asal gerilme bileşenleri c- gerilme oranı

Şekil 5.a’da kırmızı renkli daireler sıkışma (P) eksenini, mavi renkli artılar ise açılma (T) eksenini ifade etmektedir. Şekil 5.b’de asal gerilme eksenleri sırası kırmızı renk sigma 1 (σ_1), yeşil renk sigma 2 (σ_2) ve mavi renk ise sigma 3 (σ_3) olacak şekilde gösterilmiştir. Şekil 5.c’de ise gerilme oranı (R) grafiği verilmiştir. Ana gerilme rejimi, gerilme eksenlerinin konumuna bağlıdır. σ_1 düşey olduğu zaman açılma, σ_2 düşey olduğu zaman doğrultu-atım ve σ_3 düşey olduğu zaman ise sıkışma rejimi yaşanmaktadır.

Şekil 5.a’da genel olarak P eksenlerinin kuzeybatı (KB) ve güneydoğu (GD) yönelimli; T eksenlerinin ise kuzeydoğu (KD) ve güneybatı (GB) yönelimli olduğu görülmektedir. Şekil 5.a ve Şekil 5.b’den elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 5.b’de görülen asal gerilme eksenlerine ait azimut ve dalım değerleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Asal gerilme eksenlerinin doğrultu değerleri

Asal Gerilme Eksen	Azimut (°)	Dalım (°)
σ_1	206.1266	85.5648
σ_2	112.5500	0.2772
σ_3	22.5285	4.4264

Tablo 2’de görülen sonuçlar Tablo 1’e göre değerlendirildiğinde çalışma alanının bölgesel tektonik rejim türünün normal faylanmaya işaret ettiği görülmektedir.

Şekil 5.c’de verilen gerilme oranı (R) değerinin de belirlenmesi ile birlikte çalışma alanına ait gerilme modeli tamamlanmış olacaktır. Herhangi bir alandaki gerilme eksenleri arasında var olan ilişkiyi tanımlamak ve/veya etkili olan gerilme rejimini tespit etmek için kullanılan ve $0 < R < 1$ arasında değişim gösteren “R” katsayısı en büyük sıkışma (σ_1), orta sıkışma (σ_2) ve en küçük sıkışma (σ_3) olan üç gerilme eksenini ile ilişkilidir. Var olan bu ilişki Denklem (1)’de verilmiştir.

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (1)$$

“R” değeri sismolojik açıdan oldukça önemli bir katsayı olarak kabul edilmektedir [76-79]. Literatürde kabul edilen bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre “R” değeri ve karşılık geldiği sismolojik anlamı tablo halinde sunulmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. “R” değerine göre bölgesel hakim gerilme rejim türü sınıflaması

“R” Değeri	Sismolojik Anlamı
R=0	Genişleme rejimi – Normal faylanma
R=1	Sıkışma rejimi – Ters faylanma
0’a yakın olma durumu ($0 < R < 0.15$)	Doğrultu atımlı faylanmadan normal faylanmaya (Genişleme rejimi)
1’e yakın olma durumu ($0.85 < R < 1$)	Doğrultu atımlı faylanmadan ters faylanmaya (Sıkışma rejimi)
$0.45 < R < 0.55$	Doğrultu atımlı faylanma
$R \geq 0.55$ ($0.55 < R < 0.85$)	Transpresyonel (ters bileşenli doğrultu atım)
$R \leq 0.45$ ($0.15 < R < 0.45$)	Transtansiyonel (normal bileşenli doğrultu atım)

Çalışma alanı için “R” değeri Şekil 4.c’de gösterilmekte olup bu değer $R=0.2599$ ’dur. Tablo 3’e göre “R” değeri, çalışma alanının doğrultu atımlı fayların normal faylar ile birlikte çalıştığı transtansiyonel tektonik rejimin hakim olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, “R” değerinin $0 < R < 0.5$ arasında olması durumunda, çalışma alanında açılmalı bir tektonik rejimin hakim olduğu ve bu açılmalı rejimin düşey atımlı normal faylarla güncel evrimini sürdürmekte olduğu kabul edilmektedir [80]. Bu tanımlamanın da çalışma alanının bilinen tektonik geçiş yapısı ile uyumlu olması gerilme modeli sonuçlarının Coulomb gerilme analizinde kullanılacak olması açısından oldukça önemlidir.

2.3 Coulomb kırılma kriteri

Coulomb Kırılma Kriterine göre bir düzlem boyunca kırılmada rol oynayan asal kuvvet, kayma ya da teğetsel gerilmedir. Bu gerilmeyi azaltacak yönde etkiyen kuvvet ise düzleme etkiyen normal kuvvet (σ) ile iç sürtünme katsayısının (μ) çarpımıdır. Bu kuvvetlere bağlı olarak Coulomb kırılma kriteri **Denklem (2)**'de verilmiştir.

$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma \quad (2)$$

Burada; (S_0) kohezyon ya da malzemenin dayanım gerilmesi olarak tanımlanır. (τ)'nin işareti kırılmanın yönünü belirlediği için (τ) mutlak değer içerisinde gösterilmelidir.

Faylanma ve kırılma nedeni ile oluşan kalıcı gerilme veya Coulomb gerilmesindeki değişim ($\Delta\sigma_f$), kırılma öncesi ve kırılma sonrasındaki kalıcı gerilme değerlerinin farkına eşit olacaktır. Buna göre Coulomb gerilmesindeki değişim ise **Denklem (3)**'de verilmiştir.

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma - \Delta p) \quad (3)$$

Burada; ($\Delta\sigma$) ve ($\Delta\tau$) sırası ile kırılma yüzeyine etki eden normal ve kayma gerilme değerlerindeki değişimlerdir. (Δp) ise boşluk sıvı basıncındaki değişim olarak tanımlanır. ($\Delta\sigma_f$) arttığı zaman hedef fayın kırılması kolaylaşırken; azalması durumunda kırılma zorlaşır. ($\Delta\sigma_f$) değerindeki pozitif bir değişim fayın kırılmaya yaklaştığını, negatif bir değişim de kırılmadan uzaklaştığını gösterir [81].

Gerilme ve deformasyon değişimleri belirli bir hedef faya göre belirlenebileceği gibi gerilme modeline göre kabul edilen optimum konumlu faylara göre de belirlenebilmektedir. Ancak bu seçimin yapılması durumunda, farklı kinematik özellikteki optimum konumlu fayların Coulomb hesaplamaları üzerinde yaratacağı sapmalar göz önünde bulundurularak çalışma alanı içerisinde hakim olan optimum faylanma türü seçimine ve bölgesel gerilmenin tanımlanmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü hedef fay konumu tanımlanmadığı durumlarda optimum konum bölgesel gerilme alanı ile dolaylı olarak belirlenmektedir.

Gerilme ve deformasyon alanlarının belirli bir hedef faya ya da optimum konulu faylara göre haritalanabilmesi için ise bölgesel gerilmenin dışında; efektif sürtünme katsayısı, bölgesel gerilmenin büyüklüğü, Poisson Oranı ve Young Modülü değerlerinin de belirlenmesi gerekmektedir.

Gerilme ve deformasyon alanlarının Coulomb Kırılma Kriterine bağlı olarak modellenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde ise elde edilen sonuçların öncelikle bölgesel gerilme yönüne daha sonra efektif sürtünme katsayısının büyüklüğüne bağlı olarak değişiklik gösterdiği ayrıca bölgesel gerilme büyüklüğünün sonuçlar üzerinde fazla bir değişiklik yaratmadığı görülmüştür.

0.2-0.8 aralığında değişim gösteren Efektif Sürtünme Katsayısı (μ) yapılan çalışmada hata payını %25 oranında azalttığı varsayıldığı için $\mu=0.4$ olarak kabul edilmiştir [82].

Yerin mevcut gerilme miktarını net olarak belirleyebilmek mümkün olmamakla beraber genellikle 100-200 Bar arasında olduğu varsayılmaktadır. Çakır vd. [83]

tarafından yapılan çalışmada bu değer 150 Bar olarak kabul edilirken Toda vd. [84] tarafından yapılan çalışmada ise bu seçimin olabildiğince basit olması gerektiği, σ_1 ve σ_2 için sırası ile 100 Bar ve 0 bar değerlerinin uygun olacağı belirtilmiştir. Yapılan çalışmada da σ_1 100 Bar, σ_2 ve σ_3 değerleri ise 0 Bar olarak kabul edilmiştir.

Hesaplamalar için gerekli olan Poisson Oranı değeri elastik bir yarı yüzey düşünülerek 0.25 olarak kabul edilirken Young Modülü değeri de 8×10^5 olarak alınmıştır.

Çalışma alanında gerilme ve deformasyon alanlarının belirlenebilmesi için Toda vd. [84] tarafından geliştirilen MATLAB tabanlı Coulomb 3.3 programı kullanılarak Coulomb gerilme değişimleri hesaplanmış ve dağılımları haritalanmıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi, oluşturulan Coulomb gerilme değişimi haritalarında pozitif Coulomb değeri gerilmenin arttığı; negatif Coulomb gerilme değeri ise gerilmenin azaldığı alanları işaret etmektedir. Coulomb gerilme değişiminin pozitif olması ilk depremin ikinci depremi kırılmaya daha da yaklaştırdığını, negatif olması ise ikinci depremin ilk deprem tarafından kırılmadan uzak ve gerilme değerinin azaldığı bir gerilme gölgesi içerisine gönderildiğini göstermektedir [85]. Sonuç olarak Coulomb gerilme değeri arttığında kırılma işlemi kolaylaşırken Coulomb gerilme değeri azaldığında aynı işlem zorlaşmaktadır [83].

Coulomb gerilmesindeki değişim değeri de gelecekte meydana gelmesi muhtemel bir depremin belirlenmesine yönelik olarak değerlendirmelerde bulunmaya imkan vermektedir. Deprem tetikleme için herhangi bir eşik değer bulunmamakla birlikte Coulomb gerilme değerindeki değişimin 0.1-1 Bar arasında olmasının yeterli olacağı kabul edilmektedir. Ancak bu değer 0.01 Bar değerinden de küçük olduğu da görülebilmektedir [3, 5, 85, 86-90]. Yüklenen fay içinde bulunduğu gerilme durumuna göre kırılmaya yakın durumda ise Coulomb gerilme değerindeki az miktardaki bir artış bile ani olarak fayın harekete geçmesine sebep olabilmektedir [81].

Levha hareketleri ile bir fay parçasının 0.1 Bar yüklenmesi levhaların relatif hızına bağlı olarak uzun zaman gerekirebilmektedir. San Andreas Fayı'nın üzerinde levha hareketleri ile 1 Bar değerindeki bir yüklemenin oluşması için gerekli sürenin 10 yıl olduğu belirtilmiştir [8]. Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda 0.3-3 Bar değerindeki gerilme artışının bir depremin normal oluş periyodunu 3-30 yıl öne çektiği belirlenmiştir [91]. Herhangi bir deprem sonrası oluşan gerilme değişiminin etkinliği ise depremin büyüklüğüne bağlı olarak değişebilmektedir. Bu gerilme değişiminin, kabuğun kırılma kısmının altındaki astenosferin rahatlatma mekanizmasına bağlı olarak, küçük ve orta büyüklükteki depremler üzerindeki etkisi 5-10 yıl sonra ortadan kalkarken büyük depremler için etkisi çok daha uzun olabilmektedir [16, 81, 91].

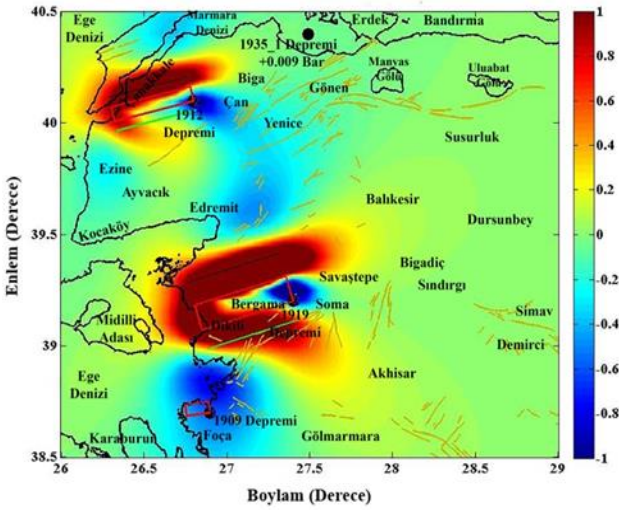
3 Bulgular ve tartışma

Balıkesir ili ve çevresinin depremselliğinin Coulomb gerilme alanı etkileşimleri açısından değerlendirilebilmesi amacıyla 1900-2022 yılları arasında meydana gelen,

Balıkesir İli ve çevresi için önemli kabul edilen depremler seçilerek Coulomb modellemeleri yapılmıştır. Modellenen depremler sırasıyla 1935 Erdek Depremleri (1935 Erdek_1 Depremi $M_w=6.4$, 1935 Erdek_2 Depremi $M_w=6.3$), 1944 Edremit Depremi ($M_w=6.8$), 1953 Yenice-Gönen Depremi ($M_w=7.2$), 1964 Manyas Depremi ($M_w=6.9$), 1969 Gönen Depremi ($M_w=6.0$), 1971 İvrindi Depremi ($M_w=5.3$), 2001 Savaştepe ($M_w=5.2$) ve 2010 Balya Depremi ($M_w=5.0$)'dir.

Depremlerin modellenmesinde amaç modellenen deprem öncesi çalışma alanının Coulomb gerilme dağılım durumunu belirlemek ve modellenen depremin kendisinden önceki depremlerle ilişki durumunu açıklamaya çalışmaktır. Bunun için öncelikle modellenecek deprem öncesi meydana gelen depremlerin, modellenen depreme ait parametreler kullanılarak oluşturdukları Coulomb gerilme dağılımları haritalanmış ve daha sonra aynı parametreler kullanılarak modellenen depremin meydana gelmeden önce sahip olduğu Coulomb gerilme değerindeki değişim hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer ise oluşturulan haritada episantr koordinatları (enlem ve boylam) üzerinde gösterilmiştir.

Modellenen ilk deprem olan 1935 Erdek_1 Depremi'nin oluşum mekanizmasının değerlendirilebilmesi için 1900-1935 yılları arasında meydana gelen depremlerin Coulomb Gerilme Dağılımı belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. 1935 Erdek_1 depremi öncesi Coulomb gerilme dağılımı

Şekil 6 1909 Foça-İzmir, 1912 Mürefte-Tekirdağ ve 1919 Soma-Manisa Depremleri'nin oluşturdukları Coulomb gerilme dağılımını göstermektedir.

Ancak bu depremler kullanılarak yapılacak değerlendirmelerde deprem parametrelerinin güvenilirliğinin sorgulanabilir nitelikte olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Sismolojik çalışmaların erken bir evresinde meydana gelen 1912 Mürefte-Tekirdağ Depremleri (09.08.1912 $M_w=7.4$, 10.08.1912 $M_w=6.2$, 13.09.1912 $M_w=6.8$) ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde deprem parametrelerinde (enlem-boylam, doğrultu-dalım-atım) dikkat çekici farklılıklar gözlenmektedir [92-94].

1912 Depremi ile benzer bir durum 1919 Depremi ile ilgili de yaşanmakta ve depremin yeri ve/veya kırığının net olarak belirlenemediğini belirten çalışmalar bulunmaktadır [81].

Bu çalışmada Şekil 3'de "2 numara" ile gösterilen deprem Eylül ayında (13.09.1912) meydana gelen 1912 Depremi, "3 numara" ile gösterilen deprem ise 1919 Soma Depremi olarak kabul edilerek değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Ayrıca 18.12.1901 tarihinde meydana gelen Ayvalık Depremi'ne ($M_s=5.9$) ait deprem ve kaynak parametreleri ile ilgili herhangi bir çalışma olmaması çalışma alanına ait gerilme ve deformasyon alanlarının modellenmelerinde önemli eksiklikler yaratmaktadır.

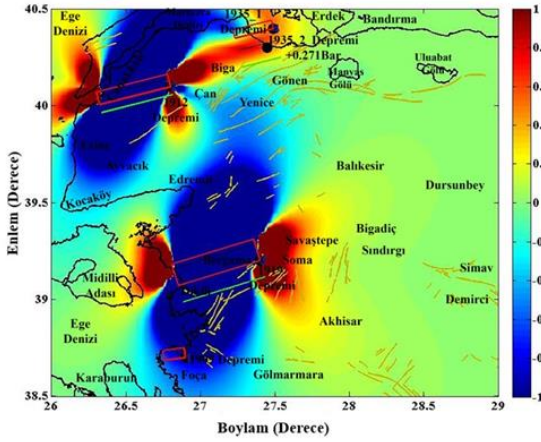
Şekil 6'da görüldüğü üzere 1909 Depremi çalışma alanı sınırları içerisinde yüzey faylanması ve önemli bir gerilme değişimi yaratamamıştır. Bu durumda depremin odak derinliğinin ($h=60$ km) etkisi bulunmaktadır. 1912 ($h=10$) ve 1919 ($h=10$) Depremleri ise aynı anda farklı alt alanların gerilme birikimi ve gerilme düşümü ile karakterize olmasına neden olarak çalışma alanının 1900-1935 yılları arasındaki deprem tehlikesinin çeşitlenmesine neden olmuşlardır.

1909 Depremi ile arasında herhangi bir etkileşimin olmadığı 1935 Erdek_1 Depremi için 1912 Depremi nedeni ile +0.051 Bar, 1919 Depremi nedeni ile de -0.042 Bar Coulomb gerilme değişim değeri hesaplanmıştır.

Az sayıda deprem verisinin kısıtlı bir zaman aralığında oluşturduğu Coulomb gerilme değerindeki değişimlere göre Erdek_1 Depremi üzerinde herhangi bir öteleme ve tetikleme etkisinin olup olmadığına dair net bir yorum yapmak oldukça zordur. 1935 Erdek_1 Depremi için hesaplanan Coulomb gerilme değerindeki değişimlerin teorik açıdan fayı tetiklemek/ötelemek için kabul edilir seviyede olmadığı görülmekle birlikte pratikte bu durumun değişebileceğini söylemek mümkündür. Çünkü daha önce de bahsedildiği gibi Erdek ve çevresi tarihsel dönemde meydana gelen yer hareketlerinin ve tsunamilerin görüldüğü önemli alt alanlardan birisidir. Bu nedenle Erdek ve çevresi gibi depremsellik açısından aktif alanlarda toplamda +0.009 Bar olarak hesaplanan Coulomb gerilme değerindeki değişimin fayı tetiklemek için yeterli olabileceğini ifade edebiliriz.

Sonuç olarak 1912 ve 1919 Depremleri'nin etkisine ek olarak 1935 Erdek_1 Depremi'ni kırılmaya hazırlayan gerilme yüklemesinin tarihsel dönem süresince Marmara Denizi ve/veya yakın çevresinde meydana gelen başka depremlerden de kaynaklanmış olabileceği oldukça güçlü bir deprem senaryosudur.

Meydana gelmesinde 1912 ve 1919 Depremleri ile birlikte tarihsel dönem deprem verilerinin etkisinin de olduğu düşünülen 1935 Erdek_1 Depremi sonrası çalışma alanında oluşan Coulomb gerilme dağılımı incelenerek 1935 Erdek_2 Depremi'nin oluşum mekanizması değerlendirilmeye çalışılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. 1935 Erdek_2 depremi öncesi coulomb gerilme dağılımı

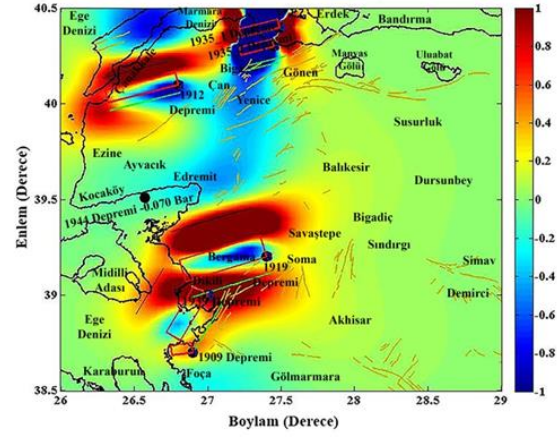
Şekil 7 1900-1935 yılları arasında meydana gelen depremlerin Çan-Biga-Marmara Denizi hattı Coulomb gerilme dağılımında önemli değişiklikler yarattığını göstermektedir. Şekil 6'da görülen bir önceki modellemeye ($h=35$ km) göre derinlik ($h=20$ km) seçiminin değişmesi ile birlikte 1912 ve 1919 Depremleri'ne bağlı olarak oluşan gerilme birikimi ve gerilme düşümü alanlarının da değiştiği görülmektedir. Bu durum Coulomb gerilme dağılımı modellerinde derinlik değişiminin önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Coulomb gerilme analizi ile yapılacak depremsellik çalışmalarında, çalışma alanının deprem geçmişi ile uyumlu parametreler kullanılmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca bu tür modelleme çalışmalarında da modellenen her deprem için genel bir derinlik değeri seçimi yerine modellenen depreme ait derinlik değerinin kullanılmasına özen gösterilmesi gerekmektedir.

1912 Depremi nedeni ile pozitif (+0.068 Bar) ve 1919 Depremi nedeni ile negatif (-0.070 Bar) olarak hesaplanan 1935 Erdek_2 Depremi Coulomb gerilme değerindeki değişim 1935 Erdek_1 Depremi sonrası +0.271 Bar olarak hesaplanmıştır. 1912 ve 1919 Depremleri'nin 1935 Erdek_2 Depremi üzerindeki etkileri ile 1935 Erdek_1 Depremi üzerindeki öteleme ve tetikleme etkisinin benzer olduğu görülmektedir.

Teorik açıdan tetikleme değeri ile karakterize olan 1935 Erdek_2 Depremi için bu etki çok açık bir şekilde 1935 Erdek_1 Depremi (+0.272 Bar) tarafından yaratılmıştır. Baştürk vd. [95] tarafından yapılan çalışmada da, ikinci depremin birinci depremin artçısı olmadığı farklı bir deprem olduğu belirtilmiştir.

Sonuç olarak tarihsel dönem depremlerinin etkili olduğu Erdek ve çevresinde meydana gelen 1935 Erdek_2 Depremi'nin oluşumunda aynı gün içerisinde meydana gelen 1935 Erdek_1 Depremi'nin etkisini Coulomb Kırılma Kriteri ile açıklamak mümkündür.

Meydana geldiği bölge açısından aletsel dönem içerisinde yaşanan en büyük ve en etkili depremlerden biri olarak kabul edilen 1944 Edremit Depremi'nin oluşum mekanizmasının değerlendirilebilmesi için 1900-1944 yılları arasındaki Coulomb gerilme dağılımı belirlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. 1944 Edremit depremi öncesi oluşan coulomb gerilme dağılımı

Şekil 8 1900-1944 yılları arasında çalışma alanı içerisinde meydana gelen $M_w \geq 5.0$ olan depremlerin 40 km derinlikte meydana getirdikleri Coulomb gerilme dağılımını göstermektedir. Ancak 1900-1944 yılları arasında gözlenen Coulomb gerilme dağılımı değerlendirilirken 18.12.1901 Ayvalık Depremi'nde olduğu gibi bu dönemde meydana gelen 1942 Bigadiç Depremi ($M_w=6.2$) kaynak parametreleri ile ilgili herhangi bir çalışma olmadığı ve bu duruma bağlı olarak çalışma alanının bu döneme ait Coulomb gerilme dağılımının eksik kaldığı göz önüne alınmalıdır.

Şekil 8'de ilk defa görülen 1939 Dikili-İzmir Depremi, Dikili-Dikili açıklarında gözlenen gerilme birikimi alanının genişlemesine neden olmuştur. Buna karşılık 1912 Mürefte-Tekirdağ ve 1919 Soma-Manisa Depremleri'nin yarattıkları etkilerde ise önemli değişiklikler görülmemektedir birlikte Şekil 6 ile benzer dağılımlar dikkat çekmektedir. Bu benzerliğin 1935 Erdek_1 ($h=35$ km) ve Edremit ($h=40$ km) Depremleri'nin derinliklerinden kaynaklandığını söylemek mümkündür.

Meydana gelmeden önce -0.070 Bar Coulomb gerilme değeri değişimi gösteren 1944 Edremit Depremi üzerindeki en büyük etki 1939 Depremi (-0.047 Bar) nedeni ile oluşmuştur. Bu değeri Edremit (Balıkesir) ve Dikili (İzmir) Depremleri arasındaki ilişkinin incelenmesi gerekliliği açısından önemli bir veri olarak ele almak mümkündür.

1939 Depremi dışında, 1909 Depremi (+0.004 Bar), 1912 Depremi (-0.019 Bar), 1919 Depremi (-0.003 Bar) ve 1935 Depremlerinin (-0.004 Bar ve -0.001 Bar) 1944 Edremit Depremi üzerindeki etkilerinin göz ardı edilebilecek seviyede olduğunu da ifade etmek gerekmektedir.

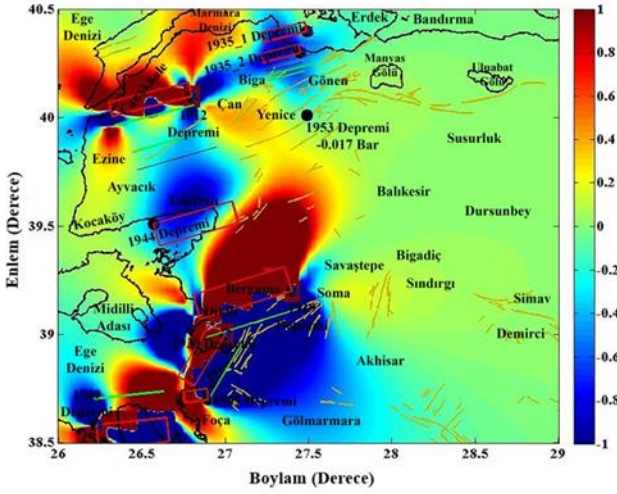
Yapılan hesaplamalardan da görüldüğü üzere gerilme gölgesi içerisinde meydana gelen 1944 Edremit Depremi'nin oluşumunda çalışma alanı sınırları içerisinde aletsel dönemde tetikleme etkisi yaratabilecek nitelikte bir deprem meydana gelmemiştir. Ancak Nalbant [81] tarafından yapılan çalışmada 1944 Edremit Depremi'nin 1919 Depremi tarafından hazırlandığı belirtilmiştir. Yapılan çalışma incelendiğinde ise, 1919 Soma (Manisa) Depremi ile ilgili deprem kaynak parametrelerinin olmadığı görülmüştür. Bu durum elde edilen sonuçların kıyaslanabilirliğini ortadan kaldırmaktadır. Sonuç olarak daha güncel deprem verilerinin ve deprem kaynak parametrelerinin kullanıldığı bu

çalışmadan elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğunu ifade etmek mümkündür.

Bu nedenle 1944 Edremit Depremi'nin oluşumunda tarihsel dönem depremlerinin ve/veya Ege Denizi depremlerinin etkili olabileceği göz ardı edilmeden kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmıştır. Yapılan paleosismolojik çalışmalarla da Edremit Fayı'nın tarihsel dönem deprem verileri ile ilişkileri ortaya konmuştur [39].

Ayrıca 1944 Edremit Depremi'nin, 1909 Foça-İzmir Depremi (+0.004 Bar) nedeni ile gösterdiği Coulomb gerilme değerindeki pozitif değişim göz önüne alındığında Edremit ve çevresi için nispeten daha derin depremlerin de etkili olabileceğini söylemek mümkündür.

1944 Edremit Depremi gibi meydana geldiği bölgenin aletsel dönem boyunca en önemli depremi olarak kabul gören 1953 Yenice-Gönen Depremi'nin oluşumu Coulomb kriterleri açısından değerlendirilerek haritalandırılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. 1953 Yenice-Gönen depremi öncesi oluşan coulomb gerilme dağılımı

Şekil 9 1953 Yenice-Gönen Depremi kaynak parametrelerine göre 10 km derinlikte meydana gelen Coulomb gerilme dağılımını göstermektedir. Bir önceki modellemeye göre en önemli değişiklik 1949 Karaburun-İzmir Depremi nedeni ile Foça ve Karaburun açıklarında görülen gerilme birikimidir.

-0.017 Bar Coulomb gerilme değeri değişimi gösteren 1953 Yenice-Gönen Depremi üzerinde 1912 Mürefte-Tekirdağ (+0.030 Bar), 1919 Soma (+0.089 Bar), 1939 Dikili (+0.005 Bar) ve 1949 Karaburun (+0.004 Bar) Depremleri'nin etkisi pozitif olarak hesaplanmıştır. 1935 Erdek (-0.029 ve -0.080 Bar) ve 1944 Edremit (-0.036 Bar) Depremleri ise negatif Coulomb gerilme değeri değişimi etkisi yaratmışlardır.

1953 Yenice-Gönen Depremi için 1912 Mürefte-Tekirdağ Depremi ile birlikte kırılma sürecinin başladığı ve asıl etkiye sahip olan 1919 Soma Depremi ile bu kırılma sürecinin hızlandığı görülmektedir. 1935 Erdek ve 1944 Edremit Depremleri nedeni ile yavaşlamaya uğrayan deprem hareketi 1939 Dikili ve 1944 Karaburun Depremleri ile

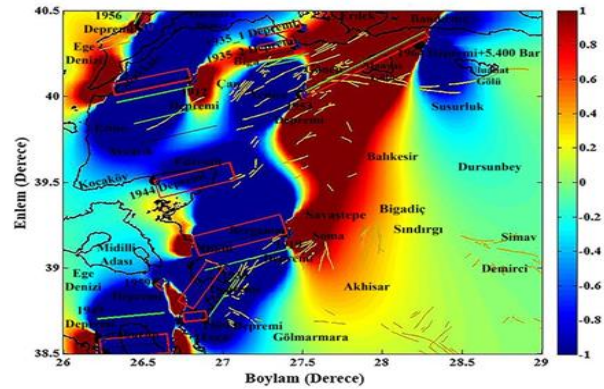
karşılanmıştır. Ancak bu değerlerin teorik olarak bir tetikleme/öteleme etkisi yaratmadığı da görülmektedir. Aletsel dönem boyunca Yenice-Gönen çevresinde önemli büyüklükte bir depremin ($M_w \geq 5.0$) meydana gelmemiş olması da bu görüşü desteklemektedir.

Yenice-Gönen Depremi oluşumunda çalışma alanı sınırları içerisinde meydana gelen depremlerin bir etkisi olmadığı görüldüğü için 1944 Edremit Depremi'nde olduğu gibi kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmıştır.

Sözbilir vd. [72] tarafından yapılan çalışmada MS 155 ile 160 depremlerinin, 1944 (Edremit) ile 1953 (Yenice) Depremleri'ne benzer tarih aralıklarına sahip oldukları ve bu depremlerin bahsi geçen faylar üzerinde sırasıyla tetiklenme yoluyla oluşmuş olabilecekları belirtilmiştir. Nalbant [81] tarafından yapılan çalışmada ise 1953 yılında, 1912 Depremi ile yüklenen Yenice-Gönen Fayının kırılarak hareket ettiği belirtilmiştir. Ancak burada sözü edilen 1912 Depremi ($40.75^\circ K-26.90^\circ D$) çalışma alanı sınırları içerisinde yer almadığı için bu etki gözlenememiştir. Kürçer vd. [96] tarafından yapılan çalışmada da Yenice-Gönen Fayı üzerinde yaklaşık olarak son 6200 yılda, 1953 Depremi dahil olmak üzere, yüzey yırtılması ile sonuçlanmış 6 deprem meydana geldiği belirtilmiştir.

Sonuç olarak 1953 Yenice-Gönen Depremi oluşumunda çalışma alanı sınırları içerisinde incelenen herhangi bir aletsel dönem depremin net bir etkisi gözlenememektedir. Buna karşılık tarihsel dönemde oldukça hareketli olan bu alt alan için 1912 ve 1919 Depremleri'nin etkisi de göz ardı edilmemelidir.

Çalışma alanında meydana gelen en büyük deprem olan 1953 Yenice-Gönen Depremi ($M_w=7.2$) sonrası oluşan 1964 Manıyas Depremi'nin modellenilebilmesi için 1900-1964 yılları arasındaki Coulomb gerilme dağılımı haritası oluşturulmuştur (Şekil 10).



Şekil 10. 1964 Manıyas depremi öncesi oluşan coulomb gerilme dağılımı

Şekil 10 1953 Yenice-Gönen Depremi ardından Bandırma-Soma hattının çok açık bir şekilde depremlere hazır hale geldiğini göstermektedir. Aynı şekilde Erdek ve çevresi, Çan-Biga, Balıkesir-Bigadiç-Sındırgı depremselliği için de yeni bir dönem başladığı görülmektedir.

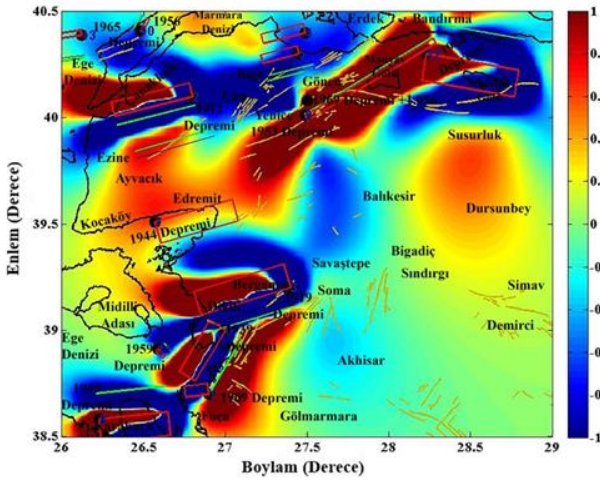
1912 Mürefte-Tekirdağ Depremi (+0.008 Bar) ile birlikte yüklenmeye başlayan 1964 Manıyas Depremi üzerinde 1935 Erdek Depremleri (+0.004 Bar, +0.005 Bar), 1939 Dikili-İzmir Depremi (+0.001 Bar) ve 1944 Edremit Depremi

(+0.011 Bar) pozitif gerilme değeri değişimleri yaratmışlardır. Bu esnada 1919 Soma Depremi (-0.017 Bar), 1949 Karaburun Depremi (-0.001 Bar) ise negatif Coulomb gerilme değeri değişimleri yaratmışlardır. Ancak 1964 Manyas Depremi için asıl etki ise 1953 Yenice-Gönen Depremi (+5.388 Bar) tarafından yapılmıştır.

Hesaplanan Coulomb gerilme değeri değişimlerine göre 1953 Yenice-Gönen Depremi'nin 1964 Manyas Depremi'nin oluşumunu hazırladığı net bir şekilde görülmektedir. Nalbant [81] tarafından yapılan çalışmada da 1953 yılında Yenice-Gönen Fayının kırılarak hareket etmiş olduğu ve kuzeydoğuda bulunan 1964 Manyas Fayı'nı oldukça büyük ölçüde yükleyerek deprem oluşuma hazırladığı belirtilmiştir.

Yapılan çalışmada modellenen depremler arasında ilk defa bu kadar net deprem etkileşiminin yakalanmış olması 1953 Yenice-Gönen Depremi'nin çalışma alanının depremselliği üzerindeki etkisini göstermektedir.

1953 Yenice-Gönen Depremi'nde Yenice ile Gönen arasındaki Yenice-Gönen Fayı'nın kuzey kolu kırılırken 1964 Manyas Depremi'nde ise Yenice-Gönen Fayı'nın güney kolu hareket etmiştir [97]. Kuzey ve güney kollarının hareketinden kısa bir süre sonra Gönen ilçesinin kuzeydoğusunda meydana gelen 1969 Gönen Depremi'nin oluşum mekanizmasının değerlendirilebilmesi için ise 1900-1969 yılları arasında Coulomb gerilme dağılım haritası oluşturulmuştur (Şekil 11).



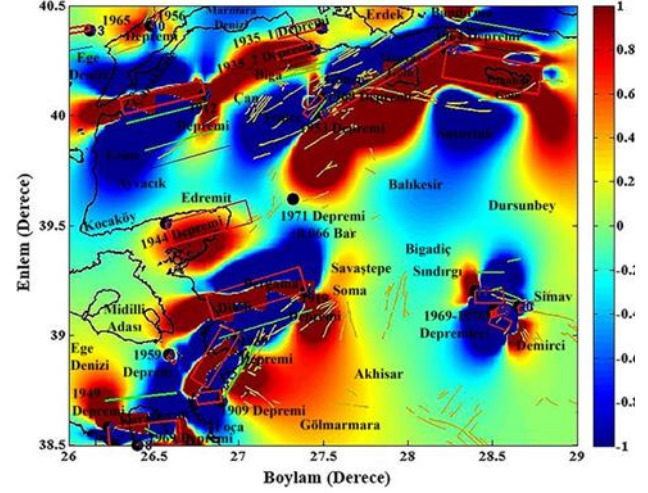
Şekil 11. 1969 Gönen depremi öncesi oluşan coulomb gerilme dağılımı

Şekil 11'de 4 km derinlikte Yenice ve çevresi, Dikili-Bergama hattı ve Foça-Soma hattında görülen gerilme birikimi dikkat çekicidir.

1900-1969 yılları arasında meydana gelen depremlere bağlı olarak 1969 Gönen Depremi'nin gösterdiği +1.056 Barlık Coulomb gerilme değeri değişimi açık bir şekilde tetikleme örneği sergilemekle birlikte asıl hareketlenme 1953 Yenice-Gönen Depremi (+0.997 Bar) sonrasında yaşanmıştır. Bu durum 1953 Yenice-Gönen Depremi'nin diğer fayları yükleyerek deprem hazırlık süreçlerini başlattığını ve/veya hızlandırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, 1953 Yenice-Gönen Depremi ile birlikte çalışma

alanının depremselliğinin net bir şekilde değiştiği görülmektedir.

1969-1970 Manisa Depremleri'nin ardından yaşanan 1971 İvrindi Depremi'nin oluşum mekanizmasını değerlendirebilmek için 1900-1971 yıllarına ait Coulomb gerilme dağılım haritası oluşturulmuştur (Şekil 12).



Şekil 12. 1971 İvrindi depremi öncesi oluşan coulomb gerilme dağılımı

Şekil 12 1969 ve 1970 Manisa Depremleri'nin etkileri ile birlikte çalışma alanının güneydoğu kanadının depremselliğinin değişmeye başladığını göstermektedir. Ancak 1969 ve 1970 Manisa Depremleri'nin 1971 İvrindi Depremi oluşumu üzerinde önemli bir etki yaratmadıklarını da belirtmek gerekmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda sadece 25.03.1969 ($M_w=6.1$) Manisa Depremi'nin, 1971 İvrindi Depremi'nin Coulomb gerilme değerinde bir değişim yarattığı görülmektedir. +0.001 Bar olan bu değer ise deprem oluşumu açısından göz ardı edilebilecek seviyededir.

1900-1950 yılları arasındaki -0.482 Barlık Coulomb gerilme değeri değişimi gösteren 1971 İvrindi Depremi için 1953 Yenice-Gönen Depremi +0.537 Barlık Coulomb gerilme değeri yüklemesi yapmıştır. 1900-1970 yılları arasında +0.066 Bar değeri ile tanımlanan 1971 İvrindi Depremi'ni de 1953 Yenice-Gönen Depremi sonrası oluşan tektonik hareketlenmenin bir ürünü olarak tanımlamak mümkündür.

Şekil 12'de asıl dikkat çeken nokta 1944 Edremit ve 1964 Manyas Depremlerinin meydana geldiği alt alanlarda gerilme birikimi görülmesidir.

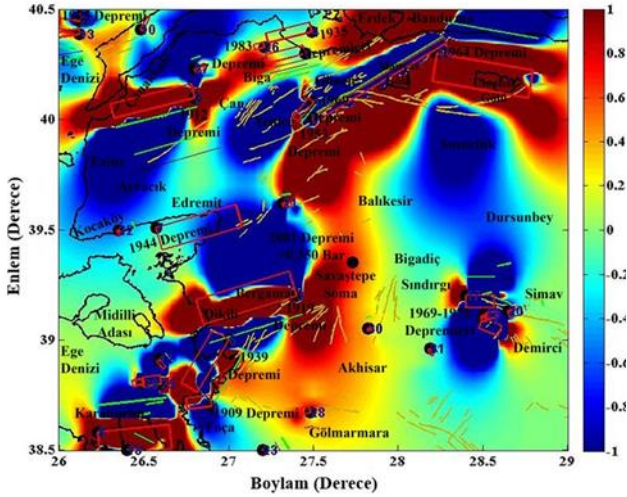
Edremit ve çevresindeki gerilme birikimini, Biga Yarımadası güneydoğusunda Edremit Körfezi ile Kepsut arasında uzanan sağ yönlü doğrultu atımlı aktif fay sistemi ile açıklamak mümkündür. 1971 İvrindi Depremi aynı fay sistemi üzerinde farklı noktalarda farklı gerilme birikimi meydana getirmiştir.

Manyas ve çevresindeki gerilme birikimi ise, Şekil 10'da görüldüğü üzere 1969 Gönen Depremi öncesinde başlamıştır. Nalbant [81] tarafından yapılan çalışmada da 1964 Depremi sonrası aynı alt alanda bir gerilme birikimi görüldüğünden bahsedilmiştir. Çalışmada, 1964 yılında

hareket eden Manyas Fayı'nın 1953 Yenice-Gönen Depremi ile üzerinde biriken gerilme birikimini boşaltırken doğu ucunda gerilme birikimi olan yeni bir bölgenin oluşmasına neden olduğu belirtilmiştir.

Sonuç olarak 1971 İvrindi Depremi oluşumunda 1953 Yenice-Gönen Depremi'nin etkili olduğu görülmekle birlikte yapılan bu modelleme Havran-Balıkesir Fay Zonu'nu oluşturan fay sistemlerinin ilişkilerinin ve 1964 Manyas Depremi sonrası bu alt alanın gerilme birikiminin tamamen boşalamadığının belirlenmesi açısından oldukça önemli sonuçlar içermektedir.

Çalışma alanı içerisinde meydana gelen $M_w \geq 6.0$ olan depremler 2000'li yılların başlaması ile birlikte yerini çoğunlukla $5.0 \leq M_w \leq 5.5$ aralığında değişim gösteren depremlere bırakmıştır. Bu depremler arasında Balıkesir İli ve çevresi için önemli depremlerden biri olarak kabul edilen 2001 Savaştepe Depremi'nin ($M_w=5.2$) oluşum mekanizmasının değerlendirilebilmesi için ise 1900-2001 yılları arasında Coulomb gerilme dağılım haritası oluşturulmuştur (Şekil 13).



Şekil 13. 2001 Savaştepe depremi öncesi oluşan coulomb gerilme dağılımı

Şekil 13'de 2001 Savaştepe Depremi öncesi çalışma alanının Coulomb gerilme dağılımında, bir önceki dönem (1900-1971) göre önemli farklılıklar görülmemesindeki nedenler arasında bu dönemde denizel depremlerin sıklığının artmaya başlaması ve daha önce de belirtildiği gibi $M_w \geq 6.0$ büyüklüğündeki depremlerin oluşum sıklığının azalması yer almaktadır.

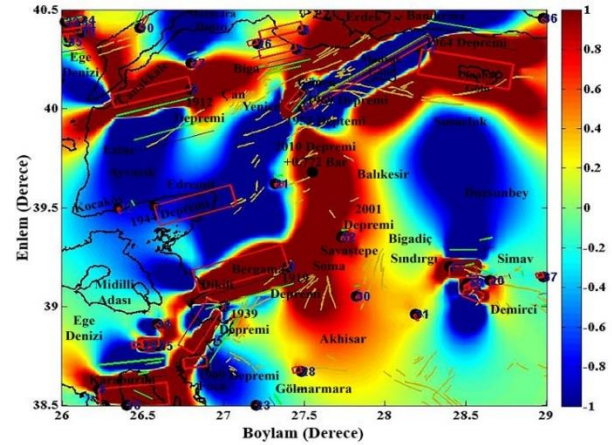
Bu dönemin (1971-2001) önemli depremleri Şekil 3'de "24 numara" ile gösterilen 1975 Depremi (27.03.1975 $M_w=6.1$) Saros Körfezi ve "26 numara" ile gösterilen 1983 Depremi (05.07.1983)'dir. Ancak yapılan literatür incelemesinde 1983 Biga Depremi magnitüd değeri ile ilgili olarak birbirinden farklı değerler ($M=5.8$, $M_s=6.1$, $M_w=6.1$, $M_w=6.8$) ile karşılaşılmıştır [96, 98-100]. Bu karışıklığa ilaveten 1983 yılında Ayvacık-Çanakkale ve Biga-Çanakkale olmak üzere iki ayrı deprem olduğu da unutulmamalıdır [101]. Farklı magnitüd değerlerine göre yapılan Coulomb gerilme değişimleri arasında çalışma

alanının sınırlarına bağlı olarak seçilen depremler için çok önemli farklılıkların yaşanmasına neden olmayan 1983 Biga Depremi'nin Çanakkale ve çevresinde etkili olan son depremlerden biri olması sebebi ile Çanakkale ve çevresinin depremselliği için daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.

Bu dönemde Erdek-Bandırma hattı ile Soma-Savaştepe arasında artan gerilme birikimi ise dikkat çekici bulunmuştur. Savaştepe (Balıkesir) civarında 24-31 Temmuz 1999 tarihleri arasında Kozderegüvem Fayı üzerinde toplam 176 deprem ve 04 Mayıs - 28 Haziran 2001 tarihleri arasında Yazören Fayı üzerinde ise yaklaşık 164 adet deprem meydana gelmiştir [102]. Bölgeye özgü yerel ölçekli faylanmalarla ilgili olduğu belirtilen deprem dizileri Soma-Savaştepe arasında artan gerilme birikimini de açıklamaktadır. Erdek-Bandırma hattında artan gerilme birikiminin ise Şekil 3'de "26 numara" ile gösterilen (05.07.1983 Biga Depremi) deprem sonrası 1000 saatlik sürede görülen 189 tane artçı deprem ile ilişkilendirmek mümkündür [98, 103].

Meydana gelmeden önce +0.350 Bar değerinde Coulomb gerilme değeri değişimi gösteren 2001 Savaştepe Depremi teorik olarak bir tetikleme depremi özelliği göstermektedir. Bu tetikleme sürecinde hiç kuşkusuz en önemli etki 1953 Yenice-Gönen Depremi (+0.260 Bar) tarafından yapılmıştır.

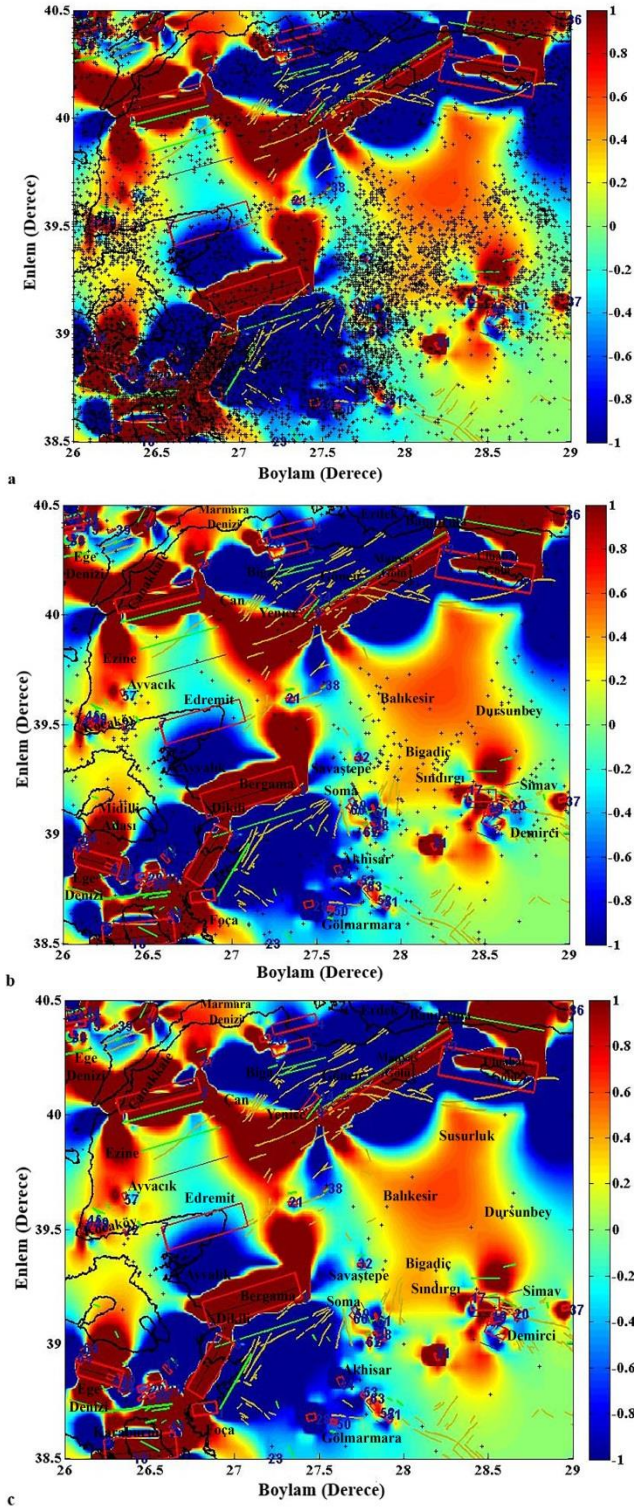
Son yıllarda meydana gelen ve Balıkesir İl merkezi ve yakın çevresi için önemli depremlerden biri olarak kabul edilen 2010 Balya Depremi'nin oluşumunun değerlendirilmesi ile birlikte çalışma alanı için daha güncel Coulomb gerilme dağılım haritası oluşturulmuştur (Şekil 14).



Şekil 14. 2010 Balya depremi öncesi oluşan coulomb gerilme dağılımı

Şekil 14 Balıkesir İlinde meydana gelen 2010 Balya Depremi kaynak parametrelerinin 7.02 km derinlikte meydana getirdikleri Coulomb gerilme dağılımını göstermektedir. Elde edilen dağılım, 2001 Savaştepe Depremi ($M_w=5.2$) sonrası çalışma alanının depremselliğini etkileyebilecek önemli bir depremin meydana gelmemesi nedeni ile bir önceki dönem (1900-2001) ile oldukça benzerdir.

1972-2010 yılları arasında meydana gelen az sayıdaki depremin ($M_w \geq 5.0$) genellikle denizel alanlarda meydana



Şekil 16. Coulomb Gerilme Dağılımı a- $M_w \geq 3.1$ b- $M_w \geq 4.0$ c- $M_w \geq 5.0$ ($h=15.5$ km)

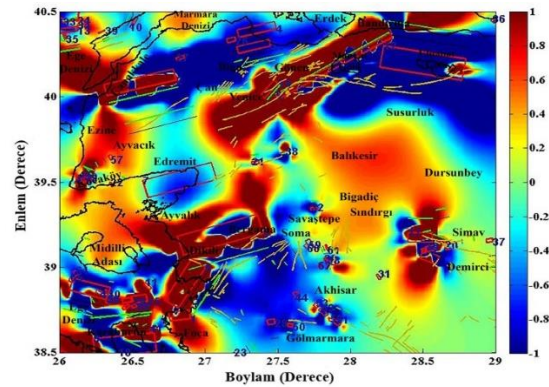
Şekil 16'da görülen artı (+) simgeleri depremlerin episantr dağılımını temsil etmektedir. Çalışma alanı için en dikkat çeken nokta hiç kuşkusuz gittikçe artan magnitüd değerine karşılık deprem yoğunluğunun kritik bir şekilde azalmasıdır.

Magnitüd değerlerinin artmasına karşılık deprem oluşumunda görülen azalış ise kendisini en net şekilde

gerilme gölgesi alanlarında göstermektedir. Bu durum Coulomb gerilme çalışması kapsamında seçilen deprem verilerinin ve de dolayısı ile elde edilen sonuçların güvenilirliğini göstermektedir. Buna karşılık gerilme birikimi alanları oldukça az sayıda deprem ile karakterize olmaktadır. Özellikle de 2000 yılı sonrası meydana gelen $M_w \geq 5.0$ depremler göz önüne alındığında gerilme birikimi alanları içerisinde meydana gelen deprem sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Gerilme birikimi ile ilgili yapılan bu tespitler geçmişinde büyük depremlere ev sahipliği yapan ancak son yıllarda deprem hareketliliği açısından görece olarak suskun bir dönem geçiren çalışma alanının güncel ve aktif depremselliğinin önemini bir kez daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. Literatür incelemesi yapıldığında da farklı fay yapılarına ve/veya bu fayların ürettiği depremlere bağlı olarak oluşan gerilim farkını karşılayabilmek için çalışma alanında deprem hareketliliği beklenildiği görülmektedir [106,107]. Sonuç olarak özellikle 1953 Yenice-Gönen Depremi'nin çalışma alanında oluşturduğu belirgin gerilme değişiklikleri de göz önüne alındığında gerilme birikimi alanlarının deprem tehlikesi açısından dikkatle takip edilmesi gerektiğini söylemek mümkündür.

Küçük ölçekte pozitif ve negatif Coulomb gerilme değerlerinin görüldüğü alt alanlar ise genellikle birbirine yakın küçük ve orta magnitüd değerlerine sahip depremlerin görüldüğü alt alanlarda karşımıza çıkmaktadır.

Ancak bazı alt alanlarda görülen gerilme gölge alanlarının durumu ise deprem sayısı ve/veya magnitüd değeri ile ilişkili olmayıp modellemede kullanılan derinlik seçimi ile ilgilidir. Bu nedenle çalışma alanı için güncel Coulomb gerilme dağılımı farklı derinlik değerlerine göre de haritalandırılmıştır. Bu aşamada derinlik değeri seçimi öncelikle bir önceki modelde kullanılan derinlik değerinin ($h=15.5$ km) yarı değerine ($h=7.75$ km) göre seçilmiş ve Coulomb gerilme dağılımı modellenmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. 1900-2022 yılları arasında oluşan coulomb gerilme dağılımı ($h=7.75$ km)

Şekil 17'de derinliğin azalmasına bağlı olarak hem denizel hem de karasal alanda gerilme değişikliklerinin meydana geldiği görülmektedir.

Bandırma-Yenice hattında devam eden gerilme birikiminin genişleme özelliği göstermesi Yenice ve çevresinde görece olarak yüzeye yakın depremlerin etkili olmasının bir sonucudur. Buna karşılık Çanakkale-Çan arasında görece olarak derin depremlerin etkili olması Biga-

gerilme alanlarının yaygın dağılımı ise çalışma alanında bu aralıkta derinlik değerine sahip depremleri beklemenin sismolojik açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çalışma alanı içerisinde; derinlik değeri seçimine bağlı olarak Çanakkale-Çan çevresini de içine alma kabiliyetine sahip Bandırma-Yenice hattı depremsellik açısından kritik öneme sahip alt alan olarak ön plana çıkmaktadır.

Deprem tehlikesi açısından Bandırma-Yenice hattını takip eden Dikili-Foça-Karaburun hattı aynı zamanda derinliğe bağlı olarak Bergama alt alanı ile birleşerek geniş bir alanda pozitif Coulomb dağılımı da yaratabilmektedir.

Karaburun açıkları ile Çanakkale açıkları başta olmak üzere Ege Denizi ve Marmara Denizi'nin farklı derinlik değerlerinde önemli deprem tehlikesi ile karakterize olan alt alanlara sahip olduğu görülmektedir.

Kendisini daha çok $5.0 \leq M_w \leq 5.5$ aralığındaki depremler ile karakterize eden Balıkesir İl merkezi ve doğu kanadında görülen gerilme birikimi dağılımında ise Yenice-Gönen Fay Zonu'nda meydana gelen depremlerin etkisi net bir şekilde görülmekle birlikte bu alt alanın depremselliği değerlendirilirken Manisa ve çevresinin aktif tektonik yapısı da göz ardı edilmemelidir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] J. C. Jaeger and N. G. W. Cook, Fundamentals of Rock Mechanics, 2nd Edn. Chapman and Hall, London, 1971.
- [2] R. S. Stein and M. J. Lisowski, The 1979 Homestead valley earthquake sequence, california: control of aftershocks and postseismic deformation. Journal of Geophysical Research, 88, 6477-6490, 1983. <https://doi.org/10.1029/JB088iB08p06477>.
- [3] G. C. P. King, R. S. Stein and J. Lin, Static stress changes and the triggering of earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 935-953, 1994. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840030935>.
- [4] K. W. Hudnut, L. Seeber, and J. Pacheco, Cross-Fault triggering in the november 1987 superstation hills earthquake sequence, Southern California. Geophysical Research Letters, 16(2), 199-202, 1989. <https://doi.org/10.1029/GL016i002p00199>.
- [5] P. A. Reasenberg and R. W. Simpson, Response of regional seismicity to the static stress change produced by the loma prieta earthquake. Science 255, 1687-1690, 1992. <https://doi.org/10.1126/science.255.5052.1687>.
- [6] R. A. Harris and R. W. Simpson, Changes in static stress on southern california faults After the 1992 Landers Earthquake. Nature, 360, 251-254, 1992. <https://doi.org/10.1038/360251a0>.
- [7] S. C. Jaumè and L. R. Sykes, Change in the state of stress on the southern san andreas fault resulting from the california earthquake sequence of april to june 1992. Science, 258, 1325-1328, 1992. <https://doi.org/10.1126/science.258.5086.1325>.
- [8] R. S. Stein, G. C. P. King, and J. Lin, Change in failure stress on the southern san andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.4 landers earthquake. science 258, 1328-1332, 1992. <https://doi.org/10.1126/science.258.5086.1328>.
- [9] S. Toda, R. S. Stein, P. A. Reasenberg, J. H. Dieterich and A. Yoshida, Stress transferred by the $M_w=6.5$ Kobe, Japan, shock: effect on aftershocks and future earthquake probabilities. Journal of Geophysical Research 103, 25543-24565, 1998. <https://doi.org/10.1029/98JB00765>
- [10] J. Deng and L. R. Sykes, Triggering of 1812 Santa Barbara earthquake by a great san andreas shock: implications for future seismic hazards in southern california, Geophysical Research Letters, 23 (10), 1155-1158, 1996. <https://doi.org/10.1029/96GL00738>.
- [11] R. S. Stein, G. C. P. King and J. Lin, Stress triggering of the 1994 $M=6.7$ northridge, california, earthquake by its predecessors. science, 265, 1432-143, 1994. <https://doi.org/10.1126/science.265.5177.1432>.
- [12] R. A. Harris, R. W. Simpson, and P. A. Reasenberg, Influence of static stress change on earthquake locations in southern california. Nature, 375, 221-224, 1995. <https://doi.org/10.1038/375221a0>.
- [13] F. F. Pollitz and I. S. Sacks, consequences of stress changes following the 1891 nobi earthquake, japan. Bulletin of the Seismological Society of America, 85 (3), 796-807, 1995. <https://doi.org/10.1785/BSSA0850030796>.
- [14] S. C. Jaumè and L. R. Sykes, Evolution of moderate seismicity in the san francisco bay region, 1850 to 1993: seismicity changes related to the occurrence of large and great earthquakes. Journal of Geophysical Research, 101, 765-789, 1996. <https://doi.org/10.1029/95JB02393>.
- [15] E. Jacques, G. C. P. King, P. Tapponnier, J. C. Ruegy, and I. Manighetti, Seismic activity triggered by stress changes after the 1978 events in the asal rift, djibouti. geophysical research letters, 23, 18, 2481-2484, 1996. <https://doi.org/10.1029/96GL02261>.
- [16] C. Nostro, M., Cocco and M. E. Belardinelli, Static stress changes in extensional regimes: an application to southern apennines (Italy). Bulletin of the Seismological Society of America, 87(1), 234-248, 1997. <https://doi.org/10.1785/BSSA0870010234>.
- [17] Balıkesir Kent Konseyi <https://www.balikesirkentkonseyi.org/sayfa/cografyasi.html> Erişim 3 Haziran 2023.
- [18] A. Beliceli, A. Çona ve F. Çoban, Balıkesir bölgesinin deprem riski ve depremsellik açısından incelenmesi. deprem sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- [19] 04 Haziran 2022 Çaypınar-Balıkesir Depremi Basın Bülteni http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2022/06/20220604_0158_Balikesir.pdf Erişim 5 Şubat 2023.
- [20] T.A.C. Zitter, J. Woodside and J. Mascle, Theanaximander mountains: a clue to the tectonics of southwest anatolia. Geological Journal, 38, 375-394, 2003. <https://doi.org/10.1002/gj.961>

- [21] M. Ergün, S. Okay, C. Sarı, E.Z. Oral, M. Ash, J. Hall and H. Miller, Gravity anomalies of the Cyprus arc and their tectonic implications, *Marine Geology*, 221, 349-358, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.03.004>
- [22] Ü.Y. Kalyoncuoğlu, Ö. Elitok, M.N. Dolmaz, N. C. Anadolu, Geophysical and geological imprints of Southern Neotethyan subduction between Cyprus and the Isparta angle, sw Turkey, *Journal of Geodynamics*, 52, 70-82, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.12.001>
- [23] N. Pinar and E. Lahn, Türkiye Depremleri İzahli Kataloğu. AKIN Matbaacılık Limited Ortaklığı, 1952.
- [24] N. Öcal, Türkiye'nin sismisitesi ve zelzele coğrafyası: 1850-1960 yılları için Türkiye zelzele kataloğu. Kandili Rasathanesi, 1968.
- [25] N. V. Shebalin, V. Karnik and D. Hadzievski, Catalogue of Earthquakes Part I, 1901-1970: Part II, Prior to 1901. Unesco, 1974.
- [26] H. Soysal, S. Sipahioglu, D. Kolcak ve Y. Altinok. Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu (M.Ö. 2100-M.S. 1900). TUBITAK, TBAG CNR, 1981.
- [27] A. Özoğul, 1987. Balıkesir Ovası ve yakın çevresinde meydana gelen depremlerin uygulamalı jeomorfoloji bakımından etkileri. Uludağ Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 11, 1, 43-51, 1987. <http://hdl.handle.net/11452/17108>.
- [28] N. N. Ambraseys and C.F. Finkel, Long-Term seismicity of Istanbul and of the Marmara Sea Region. *Terra Nova*, 3(5), 527-539, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00188>.
- [29] Y. Altinok, and Ş. Ersoy, Tsunamis Observed on and Near the Turkish Coast. *Natural Hazards*, 21, 185-205, 2000. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2386-2_5.
- [30] N. N. Ambraseys and J.A. Jackson, Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500. *Geophysical Journal International*, 141(3), F1-F6, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00137.x>
- [31] Y. Altinok, Ş. Ersoy, A. C. Yalçiner, B. Alpar and U. Kuran, Historical tsunamis in the sea of Marmara. *International Tsunami Symposium 2001 Proceedings*, Session 4, Number 4-2, sayfa 527-534, National Oceanic and Atmospheric Administration, Pasific Marine Environmental Laboratory, University of Washington, U.S.A., 7-9 August 2001.
- [32] N. Ambraseys, The seismic activity of the marmara sea region over the last 2000 years. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 1-18, 2002. <https://doi.org/10.1785/0120000843>.
- [33] Ö. Emre, S. Özalp, A. Doğan, V. Özaksoy, C. Yıldırım and F. Göktaş, İzmir yakın çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri. *Maden Tetkik Arama Raporu* 10754, 2005.
- [34] N. N. Ambraseys and C. F. Finkel, Türkiye'de ve komşu bölgelerde sismik etkinlikler: Bir tarihsel inceleme, 1500-1800 [Seismic activity in Turkey and neighboring regions: A historical investigation, 1500-1800]. TÜBİTAK Yayınları, 2006.
- [35] N. Ambraseys, Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900. Cambridge University Press, 2009.
- [36] R. Körpe, Eski çağlarda troas bölgesinde meydana gelen depremler. 09 Ağustos 1912 mürefte depreminin ($M_w=7.4$) 100. yıldönümü sempozyumu, sayfa 111-116, Çanakkale, Türkiye, 13-15 Eylül 2012.
- [37] N. Koçhan, Kyzikos, Hellespontus'da bir eyalet merkezi. *Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, 31, 69-91, 2013. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ataunigsed/issue/2584/33252>.
- [38] K. Doğanç, 2019. Hellespontos ve çevresini etkileyen depremler (MÖ 3000-MS 6. YY). *History Studies*, 11, 2, 535-555, 2019. <https://doi.org/10.9737/hist.2019.729>.
- [39] H. Sözbilir, Ç. Özkaymak, Ö. Sümer, B. Uzel, B. ve S. Eski. Balıkesir ilinin deprem tehlike kaynakları ve alınması gereken önlemler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Balıkesir İl Temsilciği Balıkesir'in Afet Durumu ve Yönetimi Çalıştayı, Balıkesir, Türkiye, 28 Şubat-01 Mart 2019.
- [40] H. Sözbilir, Ç. Özkaymak, B. Uzel, Ö. Sümer, S. Eski and Ç. Tepe, Palaeoseismology of the Havran-Balıkesir Fault Zone: Evidence for Past Earthquakes in the Strike-Slip-Dominated Contractional Deformation along the Southern Branches of the North Anatolian Fault in Northwest Turkey. *Geomatica Acta*, 28 (4), 254-272, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/09853111.2016.1171111>
- [41] H. Sözbilir, B. Uzel, Ö. Sümer, S. Eski, M. Softa, Ç. Tepe, Ç. Özkaymak ve A. Baba, Çanakkale-Ayvacık deprem fırtınasının (14 Ocak-20 Mart 2017) sismik kaynakları. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, 6, 1-17, 2018. <https://doi.org/10.20290/auhtdb.498805>
- [42] E.E. Eyübagil, İ. Tiryakioğlu, H.İ. Solak, H.H. Yavaşoğlu, C.Ö.Yiğit, B. Aktuğ, Ç. Özkaymak, M.A.Uğur, E.B.Çakanşimşek ve E. Demirelli, Havran-Balıkesir fay zonu üzerinde jeodezik çalışmalar: ilk sonuçlar. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 402-416, 2023. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1203930>
- [43] B. C. Papazachos, Dependence of the seismic parameter b on the magnitude range. *Pure and Applied Geophysics*, 112, 1059-1065, 1974. <https://doi.org/10.1007/BF00881508>.
- [44] A. Kijko and M.A. Sellevoll, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, part 1, utilization of extreme and complete catalogues with different threshold magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79, 645-654, 1989. <https://doi.org/10.1785/BSSA0790030645>
- [45] A. Kijko and M.A. Sellevoll, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, part 11, incorporation of magnitude heterogeneity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 120-134, 1992. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820010120>

- [46] M.V. Manakou and T.M. Tsapanos, Seismicity and seismic hazard parameters evaluation in the island of crete and surrounding area inferred from mixed data files. *tectonophysics*, 321,157-178, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00075-5).
- [47] U. Temiz, 1908-1998 Yılları arasında Ceyhan-Misis, Adana bölgesindeki depremlerin coulomb etkileşimleri, *Türkiye Cumhuriyet Yerbilimleri Dergisi*, 27, 1, 1-12, 2010. [https://jeoloji.cumhuriyet.edu.tr/files/2010_27\(1\).pdf](https://jeoloji.cumhuriyet.edu.tr/files/2010_27(1).pdf).
- [48] U. Temiz ve Y. E. Gökten, Ms 6.8 19 Nisan 1938 Akpınar (Kırşehir) depreminin coulomb gerilme analizi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 54, 3, 81-92. <https://dergipark.org.tr/tr/download/articlefile/285233>.
- [49] T. Ersular, A. Güneş, Y. Sarı, E. Gürbüz, H. Durmuş ve L. Gülen, 23 Ekim 2011 Van Depreminin ($M_w=7.1$) oluşturduğu coulomb gerilme değişimi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19, 1, 53-58, 2015. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.72489>
- [50] E. Gök, M. Erdem ve Ç. Özer, Kocaeli ve çevresi için coulomb gerilme analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 1-11, 2020. <https://doi.org/10.21923/jesd.492508>
- [51] E. Bayrak, Ç. Özer ve Ş. Perk, Erzurum ve çevresi için gerilme tensör ve coulomb analizleri. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 2 (1), 101-114, 2020. <https://doi.org/10.46464/tdad.737222>
- [52] H. Alkan and E. Bayrak, Coulomb stress changes and magnitude-frequency distribution for Lake Van Region. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 168, 141-156, 2022. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.990666>.
- [53] D. P. McKenzie, Active tectonics of the mediterranean region. *Geophysical Journal of Royal Astronomical*, 30, 109-185,1972. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>.
- [54] J. Jackson and D. McKenzie, Active tectonics of the alpine-himalayan belt between Western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 77, 185-264, 1984. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x>.
- [55] T. Taymaz, J. Jackson and D. McKenzie, Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106, 433-490, 1991.<https://doi.org/10.1111/j.1365246X.1991.tb03906.x>.
- [56] E. E. Papadimitriou and L. R. Sykes, Evolution of the stress field in the Northern Aegean Sea (Greece). *Geophysical Journal International*, 146, 747-759, 2001.<https://doi.org/10.1046/j.0956540x.2001.01486.x>.
- [57] A. A. Kiratzi, Stress Tensor inversions along the westernmost north anatolian fault zone and its continuation into the north aegean sea. *Geophysical Journal International*. 151, 360-376, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01753.x>
- [58] A. Kiratzi and E. Louvari, Focal mechanism of shallow earthquakes in the aegean sea and the surrounding lands determined by waveform modelling: a new database. *Journal of Geodynamics*, 36, 251-574, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00050-4).
- [59] O. Tan, M. C. Tapırdamaz and A. Yörük, The earthquake catalogues for Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 405-418, 2008. <https://journals.tubitak.gov.tr/earth/vol17/iss2/8>.
- [60] S. A. Poyraz, Isparta büklümünü oluşturan tektonik yapıların sismolojik yöntemlerle araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [61] P. M. Paradisopoulou, E. E. Papadimitriou, V. G. Karakostas, T. Taymaz, A. Kiliyas, A. and S., Yolsal, Seismic hazard evaluation in Western Turkey as revealed by stress transfer and time-dependent probability calculations. *Pure and Applied Geophysics*, 167, 1013-11048, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0085-1>.
- [62] E. Görgün, D. Kalafat and K. Kekovalı, Source Mechanism and stress field of the 2017 Ayvacık/Çanakkale earthquake sequence in NW Turkey. *Annals of Geophysics*, 63,3, SE332, 2020. <https://doi.org/10.4401/ag-8194>.
- [63] Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/event-focal-mechanism>, Erişim 27 Aralık 2022
- [64] International Seismological Centre. <http://www.isc.ac.uk/>, Accessed 27 December 2022
- [65] The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT). <https://www.globalcmt.org/>, Accessed 27 December 2022
- [66] N. C. A. Kılıç ve Ü. Y. Kalyoncuoğlu, İzmir ili ve çevresi için coulomb gerilme değişimi ve deprenselliğinin bölgesel dağılımı. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir, Türkiye, 14-16 Ekim 2015.
- [67] S.A. Wiemer, Software package to analyze seismicity: Zmap, *Seismological Research Letters*. 72, 2, 374-383, 2001. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>.
- [68] P.A. Reasenbergl, Second-order moment of central California seismicity 1969-1982. *Journal of Geophysical Research*, 90, B7, 5479-5495, 1985. <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>.
- [69] S. Wiemer and M. Wyss, Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 4, 859-869, 2000. <https://doi.org/10.1785/0119990114>.
- [70] B. Uzel, H. Sözbilir, Ç. Özkaymak, N. Kaymakçı and C. G. Langereis, Structural evidence for strike-slip deformation in the İzmir-Balıkesir transfer zone and consequences for late cenozoic evolution of Western Anatolia (Turkey). *Journal of Geodynamics*, 65, 94-116, 2013.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2012.06.009>
- [71] Ç. Özkaymak, H. Sözbilir and B. Uzel, Neogene-Quaternary evolution of the Manisa Basin: evidence for variation in the stress pattern of the İzmir-Balıkesir transfer zone, Western Anatolia. *Journal of Geodynamics*, 65, 117-135, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.06.004>

- [72] H. Sözbilir, Ö. Sümer, Ç. Özkaymak, B. Uzel, T. Güler and S. Eski, Kinematic analysis and palaeoseismology of the Edremit fault zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the north anatolian fault zone, Biga Peninsula, NW Turkey. *Geodinamica Acta*, 28, 4, 273-294, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/09853111.2016.1175294>
- [73] Ö. Sümer, B. Uzel, Ç. Özkaymak and H. Sözbilir, Kinematics of the Havran-Balıkesir fault zone and its implication on geodynamic evolution of the southern Marmara Region, NW Anatolia. *Geodinamica Acta*, 1, 306-323, 2018. <https://doi.org/10.1080/09853111.2018.1540145>
- [74] V. Vavrycuk, Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophysical Journal International* 199(1), 69-77, 2014. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu224>.
- [75] M. L. Zoback, First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research in Atmospheres*, 97(B8), 11703-11728, 1992. <https://doi.org/10.1029/92JB00132>
- [76] E. Carey-Gailhardis and J. L. Mercier, A numerical method for determining the state of stress using focal mech. of earthquake populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of Southern Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 82, 165-179, 1986. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90117-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90117-8)
- [77] R. J. Twiss and E. M. Moores, *Structural Geology*. W.H. Freeman and Company, New York, U.S.A., 1992.
- [78] S. Över, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun orta ve batı kesiminde bölgesel gerilme durumunun incelenmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 42, 1, 85-96, 1999. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/440509a0106086a_ek.pdf?dergi=T%DCRK%DDYE%20JEOL.OJ%DD%20B%DCLTEN%DD
- [79] C. Christova and T. Tsapanos, Depth distribution of stresses in the Hokkaido Wadati-Benioff Zone as deduced by inversion of earthquake focal mechanisms. *Journal of Geodynamics* 30(5), 557-573, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(00\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(00)00009-0).
- [80] D. Kalafat, Y. Güneş, M. Kara ve K. Kekovalı, Sultandağı Fay Zonu'nun (Afyonkarahisar-Konya, Batı Anadolu) güncel depremselliğine bir bakış. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 163, 195-218, 2020. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.721796>.
- [81] S. S. Nalbant, Depremlerin oluşturduğu deformasyon ve gerilme alanlarının modellenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1996.
- [82] G. C. P. King, Fault interaction, earthquake stress changes, and the evolution of seismicity. *Treatise on Geophysics*, 4, 225-255, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00069-9>.
- [83] Z. Çakır, A. Bark ve S. Akyüz, Coulomb gerilme etkileşimleri ve 1999 Marmara Depremleri. *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, 2, 4, 99-111, 2003. [file:///C:/Users/user/Downloads/795-2112-1PB%20\(11\).pdf](file:///C:/Users/user/Downloads/795-2112-1PB%20(11).pdf)
- [84] S. Toda, R. S. Stein, V. Sevilgen and J. Lin, Coulomb 3.3 graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake. Tectonic, and Volcano Research and Teaching User Guide, USGS, 2011.
- [85] R. A. Harris, Introduction to special section: stress triggers, stress shadows and implications for seismic hazards. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24347-24358, 1998. <https://doi.org/10.1029/98JB01576>.
- [86] A. Ziv and A. M. Rubin, Static Stress Transfer and Earthquake triggering: no lower threshold in sight?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105(B6), 13631-13642, 2000. <https://doi.org/10.1029/2000JB900081>
- [87] G. C. P. King and M. Cocco, Fault interactions by elastic stress changes: new clues from earthquake sequences. *Advances in Geophysics*, 44, 1-38, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(00\)80006-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(00)80006-0)
- [88] S. Rajput, V.K. Gahalaut and V.K. Sahu, Coulomb stress changes and aftershocks of recent Indian earthquakes. *Current Science*, 88, 4, 576-588, 2005. <http://www.jstor.org/stable/24110257>.
- [89] P.S. Raju, V.K. Gahalaut and M.R. Kumar, Phodong (Siikim) earthquake of 14 February 2006 and its aftershocks-coulomb stress analysis. *Journal of Geodynamics*, 46, 63-67, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2008.04.001>
- [90] R. B. S. Yadav, E. E. Papadimitriou, V. G. Karakostas, D. Shanker, B. K. Rastogi, S. Chopra, A. P. Singh, and S. Kumar, . The 2007 Talala, Saurashtra, Western India earthquake sequence: tectonic implications and seismicity triggering. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 303-314, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.07.001>
- [91] R. S. Stein, A. A. Barka, and J. H. Dieterich, 1996, progressive failure on the North Anatolian Fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*, 123, 3, 594-604, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x>.
- [92] C. Erkmén and B. Eravcı, Revised destructive earthquake catalogue for Turkey and Nearby. european seismological commission 31st general assembly, Crete, Greece, 7-12 September 2008.
- [93] S. Ç. Yıldız, S. Özden, S. Z. Tutkun, Ö. Ateş, S. A. Poyraz, S. K. Yeşilyurt ve Ö. Karaca, Ganos Fayı boyunca geç senozoyik yaşlı gerilme durumları, KB Türkiye. *Türkiye Jeolojii Bülteni*, 56, 1, 1-22, 2013. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/issue/28136/299041>.
- [94] M. E. Aksoy, Z. Çakır, M. Valee and M. Meghraoui, Tarihsel sismogramların yeniden değerlendirilmesi: 1912 Depremleri Örneği, *İTÜ Dergisi/d*, 9, 3, 110-120, 2010. http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_d/article/view/1173.
- [95] N. B. Baştürk, N. M. Özel and M. Caciagli, Seismic parameters re-determined from historical seismograms of 1935-Erdek-Marmara Island and 1963-Çınarcık Earthquakes. *Earth, Planets and Space*, 68, 2-20, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0528-8>.

- [96] A. Kürçer, S. Özalp, E. Özdemir, Ç. U. Gündoğan ve T. Y. Duman, 18 Mart 1953 Yenice-Gönen Depremi ($M_s=7.2$) ışığında Yenice-Gönen Fayı'nın aktif tektonik ve paleosismolojik özellikleri. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 159, 29-63, 2019. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.500553>.
- [97] H. H. Selim, H. Eyidoğan ve Tüysüz, O., 2005. Güney Marmara Bölgesi'nde tarihsel ve aletsel dönemlerde oluşan depremlerin sismolojik ve jeolojik incelenmesi. Deprem Sempozyumu, sayfa 112-118, 23-25 Mart 2005, Kocaeli.
- [98] Ü. Kıyak, Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Batı Uzantılarının İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Türkiye, 1986.
- [99] D. Perinçek, Çanakkale Yöresi (KB Türkiye) Erenköy ve Güzelyalı Fosil Heyelanlarının Jeolojik ve Jeomorfolojik Analizi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 61, 241-268, 2018. <https://doi.org/10.25288/tjb.458432>.
- [100] D. Akçay, Marmara Bölgesi'ndeki kuvvetli yer hareketi istasyonları için spektral azalım parametresi (κ) belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [101] H. Sözbilir, Ö. Sümer, B. Uzel, M. Softa, Ç. Tepe, S. Eski, Ç. Özkaymak ve A. Baba, 14 Ocak-28 Şubat 2017 Çanakkale-Ayvacık depremleri ve bölgenin depremselliği. Dokuz Eylül Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Araştırma Merkezi Diri Fay Araştırma Grubu, 2017.
- [102] D. Ramazan, D., 07-25 Haziran 2003 Sındırgı-Bigadiç depremleri deprem fırtınası. https://www.researchgate.net/publication/332111884_07-25_Haziran_2003_Sindirgi_Bigadic_Depremleri_Deprem_Firtinasi_mi/citation/download Erişim 2 Şubat 2023.
- [103] E. Alsan, L. Tezuçan, E. Başarır, E. Ayhan, N. Sancaklı, 5 Temmuz 1983 Biga Depremi ve artçı deprem etkinliği, Deprem Araştırma Dairesi Bülteni No:46, 50-75.
- [104] Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/> Erişim 5 Şubat 2023.
- [105] A. H. Ferrari, A. Narka, E. Jacques, S. S. Nalbant, B. Meyer, R. Armijo, P. Tapponnier, G. C. P. King, Seismic hazard in the Marmara Sea Region following the 17 August 1999 Izmit Earthquake. Nature, 404 (6775), 269-273, 2000. <https://doi.org/10.1038/35005054>.
- [106] H. Sözbilir, Ö. Sümer, B. Uzel, S. Eski, Ç. Tepe ve M. Softa, 12 Haziran Midilli Depremi (Karaburun Açıkları) ve bölgenin depremselliği. Dokuz Eylül Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi Diri Fay Araştırma Grubu, 2017.
- [107] H. Sözbilir, B. Uzel, Ö. Sümer ve S. Eski, 25 Aralık 2017-10 Ocak 2018 İzmir Körfezi depremleri ve İzmir İlinin Depremselliği Raporu. Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Diri Fay Araştırma Grubu, 2018.





Assessment of UV-vis driven CFT-GO based photocatalysis on the conjugative gene transfer mechanism in a pilot plant system

UV-VIS kaynaklı CFT-GO tabanlı pilot ölçek fotokataliz prosesinin konjugatif gen transfer mekanizmasına etkisinin belirlenmesi

Can Burak Özkal^{1,*} 

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 59860, Tekirdağ Türkiye

Abstract

This study addresses the need for sustainable methodologies in antimicrobial resistance (AMR) surveillance, particularly in wastewater treatment, to ensure efficient disinfection and control of AMR. The use of photocatalysis (PC) has gained attention as a scalable and suitable approach for research and development. This study evaluates the effect of UV-vis driven sub-lethal photocatalytic oxidation on conjugative gene transfer between two *E. coli* strains using a pilot plant reactor system. Photocatalysts composed of graphene-oxide-Ti-CuFe₂O₄ nanocomposites were synthesized through a green approach and used to enhance bacteria inactivation rates, resulting in hindered frequency and absolute abundance of trans-conjugants in the recipient strains. Experiments plan was built with the intent to determine the contribution of photocatalyst type, mode of operation on the conjugation mechanism and also distinguish between the scenarios where individual or simultaneous exposure to PC oxidation of donor and recipient strains occur. Simultaneous photocatalytic treatment of both donor and recipient strains resulted in the removal of ~3 LOG of both bacteria and eligible conditions were obtained for controlling trans-conjugants formation compared to no treatment conditions. The photocatalyst surface, reactive oxygen species, and bacterial cells' interaction played a determining role in controlling ARG transfer. The impact of photocatalytic oxidation mechanisms on the vitality of recipient cells was evident during the continuous mode of operation, where conjugative transfer of ARGs was mitigated, and the number of trans-conjugants decreased to below 102 CFU mL⁻¹. This study demonstrates the potential of PC for efficient disinfection and control of AMR in wastewater treatment.

Keywords: Antibiotic resistance, Antibiotic resistance gene, Conjugative gene transfer, Photocatalysis, Bacteria inactivation

1 Introduction

The misuse, overuse, and inadequate disposal of antibiotics have resulted in a significant increase in antibiotic resistance genes (ARGs). Antibiotics exert selective pressure on

Öz

Bu çalışma, antimikrobiyal direncin kontrolünde (AMR) sürdürülebilir yaklaşımlar arasında olan, atıksuyun etkin dezenfeksiyonu üzerine kurulmuştur. Fotokataliz prosesi, ölçeklenebilir, araştırma ve geliştirmeye açık bir ileri oksidasyon prosesidir. Deneysel çalışmalarda kullanılan grafen-oksit-Ti-CuFe₂O₄ nanokompozit fotokatalizörleri, yeşil bir yaklaşımla sentezlenmiştir. Parabolik kolektör destekli fotoreaktörde, sub-letal fotokatalitik oksidasyonun alıcı ve verici *E. coli* suşları arasındaki konjugatif gen transferi mekanizmasına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı fotokatalizörlerin bakteri inaktivasyon hızı üzerine etkisi yanında, alıcı suşlarda eşleşmiş çiftlerin oluşumu (transkonjugan) frekansını ve nihai miktarını azaltan bir etki gösterdiği ortaa konulmuştur. Deneysel planı, fotokatalizör tipinin ve proses işletme modunun konjugasyon ile gen transfer mekanizmasına katkısını belirlemek, verici ve alıcı suşların PC oksidasyona tekil veya eşzamanlı maruz kalma senaryoları arasındaki farkı ortaya koabilmek amacıyla oluşturulmuştur. Alıcı ve verici suşların eşzamanlı olarak fotokatalitik oksidasyona maruz kalması, her iki suş için de yaklaşık ~3 LOG giderim sağlamış ve transkonjugan oluşumunu kontrol edebilecek koşullar oluşturmuştur. Fotokatalizör yüzeyi, reaktif oksijen türleri ve bakteriyel hücrelerin etkileşimi, ARG transferinin kontrolünde belirleyici bir rol oynamıştır. Alıcı hücrelerin canlılığı üzerindeki fotokatalitik oksidasyon mekanizmalarının etkisi, konjugatif ARG transferinin azaltıldığı sürekli işletme sırasında açıkça görülmüş ve transkonjuganların sayısı 102 CFU mL⁻¹'nin altına düşmüştür. Bu çalışma, PC'nin atıksu arıtımında etkili dezenfeksiyon ve AMR kontrolü için potansiyelini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Antibiyotik direnci, Antibiyotik direnç geni, Konjugatif gen transferi, Fotokataliz, Bakteri inaktivasyonu

bacteria, and ARGs emerges as a response and the need for the development of new antibiotics arises [1–3].

Specific measures can be taken at waste water treatment plants (WWTP) and industrial discharge rates to mitigate the AMR and ARG associated risks [4–6]. ARGs are DNA

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cbozkal@nku.edu.tr (C. B. Özkal)

Geliş / Received: 19.04.2023 Kabul / Accepted: 07.09.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1285885

fragments that encode antibiotic resistance. They are present in mobile genetic elements, chromosomal and extrachromosomal DNA, while the latter possess persistency and transformation abilities. Plasmids, transposons, and integrons are mobile genetic elements that have high transfer capacities and facilitate the horizontal transfer of resistance genes between bacterial species and strains. HGT occurs through four mechanisms; conjugation, transformation, transduction, and gene transfer agents. Even after bacterial cell death, ARGs can persist in the environment as genetic material for extended periods, which can be acquired by other bacteria through the transformation mechanism [7–9]. It was hypothesized in the last decade that wastewater treatment plant (WWTP) effluents may act as a source and carrier of mobile genetic elements into downstream environments. Therefore, it is essential to prioritize the development and dissemination of wastewater treatment (WWT) alternatives that can achieve AR control [10,11]. The proliferation of multidrug-resistant bacteria is attributed to an increase in transconjugant numbers [12]. Given the global nature of the antibiotic resistance crisis, not only changes in conjugative transfer frequencies but also the abundance and fate of transconjugants in a unit volume of treated water must be monitored. Treatment process mechanisms play a crucial role in the level of bacterial inactivation, HGT inhibition, reduction, and inhibition of bacterial reactivation [13–15].

Recent studies have highlighted the significant impact of advanced oxidation processes on HGT mechanisms. NaClO has been found to enhance cell permeability [16], while nano Al₂O₃ has been shown to promote expression mating pair formation between *E. coli* species (via RP4 plasmid) due to oxidative stress. Additionally, "sub-lethal photocatalysis" with nano ZnO and nano TiO₂ has resulted in increased cell permeability and over 20- and 70-fold increases in the CGT, respectively. Meanwhile, CuO, Ag, and Fe₂O₃ in nano form have been reported to cause approximately a two-fold increase in HGT [17–19]. The bacterial defense mechanisms against reactive oxygen species (ROS)-induced cellular damage may play a decisive role in total and antibiotic-resistant bacteria species. The DNA damage resulting from UV-based disinfection processes, including UV/H₂O₂ and UV/chlorination, remains tolerable due to the substantial effect of OH on DNA structure and depletion by intracellular components [20]. Disinfectants such as chlorine and hypochlorous acid have also been found to promote the conjugative transfer of ARGs. However, chlorination at high doses has been reported to cause changes in cell membranes [3,16,21].

In the practical application of photocatalytic technology for wastewater treatment, variations in water quality may lead to bacteria cells to survive ROS-induced stress [22,23]. Besides, sub-lethal photocatalysis has the potential to increase intracellular ROS levels in ARB and activate antioxidant systems. These mechanisms are known to trigger the HGT of ARGs through transformation and conjugative transfer mechanisms. The mode of process operation and photocatalyst choice play a determining role in the

mechanism of conjugative transfer in the treated effluent [24–26].

The photocatalytic process is currently transitioning from laboratory-scale to pilot and full-scale applications, thanks to recent advances in the field of photocatalyst synthesis and reactor design. This can be achieved through doping semiconductor photocatalysts with metal dopants, forming heterojunctions between semiconductors, band gap narrowing, impurity energy level reduction, and the creation of oxygen vacancies [27]. Graphene-based composite structures and spinel ferrite-based nanocomposites are widely used in photocatalysis and adsorption processes for pollutant removal. However, graphene oxide (GO) and reduced GO may cause intracellular ROS accumulation, affecting bacterial cell membrane structure and hindering the conjugative transfer of RP4 plasmid-borne ARGs. The membrane stability also plays a significant role in HGT, where graphene oxide/reduced graphene oxide sheets can damage the cell membrane and contribute to the conjugative transfer mechanism [28–32]. Additionally, for disinfection using graphene-based TiO₂ nanocomposites, the adhesive interaction between the photocatalyst and bacteria is a crucial factor in achieving total inactivation and preventing re-growth mechanisms [33–36].

Recent studies have investigated the potential contribution of environmental photocatalyst interfaces in the co-existence of natural minerals and light irradiation [37]. To understand bacterial responses to transformed nanomaterials, researchers have examined the effect of naturally occurring photocatalysts on horizontal gene transfer (HGT) mechanisms of antibiotic-resistant (AR) bacteria, with a particular focus on sphalerite applications. The study by Yin in 2021 found that UV-A and UV-vis-based photocatalysis using sphalerite increased HGT by 2-10 and 1-2 folds, respectively [33,38].

As natural water matrices contain graphene oxide (GO) that may undergo different reduction processes, resulting in significant variations in ARG propagation mechanisms by conjugation [39], this study aims to determine the effect of photocatalytic oxidation at sub-lethal process conditions on the conjugative gene transfer mechanism between two *E. coli* strains (DSM-3876 donor and ATCC33694 recipient). Experiments were carried out in a pilot plant photocatalysis reactor at continuous and batch modes of operation. Effects of photocatalytic oxidation on the rate of conjugative gene transfer have been determined for GO based photocatalysis under UV-vis irradiation in comparison with the UV-A driven TiO₂ based photocatalysis.

2 Materials and methods

2.1 Bacterial strains and growth procedures

The experimental study utilized two strains of *E. coli*, namely Streptomycin resistant ATCC 33694 and Ampicillin, Tetracycline, and Kanamycin resistant J-53 (3876), which represent facultative pathogenic bacterial groups. The *E. coli* J-53 (DSM-3876) strain, which harbors the RP4 plasmid, was used as the donor, while the *E. coli* ATCC 33694 strain, which confers plasmid resistance to Streptomycin antibiotic, was selected as the recipient strain. The main objective of the

study was to investigate the effect of sub-lethal PC process on the frequency and occurrence of conjugative ARG transfer, as well as to confirm that resistance gene transfer from donor to recipient strains can be achieved via plasmid RP4 [40,41].

Initially, single colonies of both bacterial strains were taken from refrigerated stock plates and cultured in Luria-Bertani liquid broth, supplemented with ampicillin (100 µg/mL), kanamycin (50 µg/mL), tetracycline (16 µg/mL), and streptomycin (200 µg/mL) [23,42].

The cultures were then incubated at 37 °C for 20 hours, and 100 µL of cells were streaked onto agar plates containing the corresponding antibiotic concentrations. The antibiotic resistance behavior of both strains was initially validated using agar dilution methodology, based on their growth ability on the corresponding agar plates. The initial bacterial concentration was determined by measuring the absorbance at 600 nm wavelength using McFarland standards with 0.8% NaCl.

The successfully mated strains, which gained multiple resistance to both Amp, Kan, Tet, and Str antibiotics via conjugative transfer of ARGs, were isolated and stored in glycerol stock solution at -80 °C for further experiments.

2.1.1 Chemicals

The experimental setup also involved the use of CuCl₂, FeCl₃, NaOH, citric-acid in powder form, PEG 600 (CAS #25322-68-3), titanium dioxide (TiO₂: CAS# 1317-70-0), and titanium tetra-Isopropoxide solution (CAS#546-68) to achieve desired chemical reactions. Additionally, a graphene oxide solution was prepared by diluting a GO flake suspension (4 mg mL⁻¹ suspension; Sigma-Aldrich) with distilled water to attain a final concentration of 2.5 mg mL⁻¹. The microbiological studies also utilized antibiotic standards such as Ampicillin sodium salt, Ampicillin (CAS 69-52-3), Streptomycin (CAS number: 3810-74-0), Tetracycline (CAS 64-75-5), and Kanamycin with analytical and cell culture grade purity.

2.1.2 Synthesis of photocatalysts

In this study, the nanocomposite synthesis procedure involved the use of *Cydonia oblonga* seed extracts (COSE) that were prepared as described in detail elsewhere [43]. The CFT-GO photocatalyst, which features a heterojunction with Schottky-like formation, was utilized due to its excellent UV-vis bacteria inactivation capabilities, as well as its characterization findings from a prior study [44]. The magnetically recoverable CFT-GO 3% (w/w) photocatalyst, which was synthesized via a combination of hydrothermal methods and sol-gel techniques in three consecutive steps, was chosen for experimentation based on its demonstrated superior bacterial inactivation potential in a recent study conducted by our research group [44].

The hydrothermal synthesis process was utilized to create the nanocomposite using COSE and a CuCl₂/FeCl₃ solution with a 1:2 mmol ratio. The resulting precipitate underwent washing, centrifugation, heating, and calcination steps as previously described [44]. A GO solution was prepared by diluting a GO flake suspension (4 mg mL⁻¹; Sigma-Aldrich) in distilled water to achieve the desired concentration. The

GO/CuFe₂O₄ composite with the intended gravimetric ratio was generated following previously described procedures. The produced CuFe₂O₄-GO composite was subsequently added to the polymeric precursor solution. To produce the CuFe₂O₄-Ti-GO solution, the final product GO/CuFe₂O₄ was added to the polymeric precursor solution. The CuFe₂O₄-GO to Ti weight ratio was set to 3. The Ti(IV) polymeric precursor was created by maintaining constant 1:1:2 (w/w) ratios for Ti-isopropoxide, citric acid, and PEG. The Ti-isopropoxide-citric acid solution was prepared in distilled water while being continuously stirred for 18 h. PEG was then added under stirring conditions at 50 °C for 1 h.

2.1.3 Characterization of NC photocatalysts

The nanocomposite material was characterized using various analytical techniques. Scanning electron microscopy (SEM) was performed with magnification ranging from ×1000 to ×10,000, and energy dispersive X-ray analyses (EDX) were conducted using an FEI Quanta FEG250 instrument from Thermo-Fisher Scientific, Waltham, MA, USA. Fourier transform infrared spectroscopy analysis was conducted using a Vertex 70 model instrument from Bruker, Billerica, MA, USA. Raman spectroscopy was carried out at 532 nm excitation using a DXR instrument from Thermo-Fisher Scientific, and the analysis was performed at TNKU Central laboratory (NABİLTEM). In addition, diffuse reflectance, photo-luminescence, BET and XRD evaluations were performed, and detailed characterization and analysis parameter values have been provided in previous work [44].

2.1.4 Reactor configuration

To create a reactor system capable of operating under both solar and simulated UV irradiation, a pilot plant system was utilized. This system includes a concentrating parabolic collector composed of anodized aluminum parts, chosen for their high UV irradiation reflectance rates. This configuration enables the efficient collection and concentration of UV irradiation on the back side of the cylindrical photocatalysis reactor. The reactor itself is constructed from Plexiglass material due to its high UV transmission rate of >90%. The liquid is fed into the system using a sprinkler-like apparatus located at the top of the reactor, which sprays the liquid onto the inner surface of the reactor. During the heterogeneous photocatalysis process, the liquid flows down through the inner wall of the reactor via gravity and exits the system through a pneumatic valve before returning to the feeding tank. These details were reported in previous studies [45–50].

In order to enable the operation of a reactor configuration under both simulated UV and solar irradiation, a pilot plant system was designed and equipped with a concentrating parabolic collector, which is made of anodized aluminum parts due to their high UV irradiation reflectance rates. This configuration allows for efficient collection and concentration of UV irradiation on the back side of the cylindrical photocatalysis reactor, which is made of Plexiglass material, since it has a high UV transmission rate of over 90%. To initiate the heterogeneous photocatalysis process, a sprinkler-like apparatus placed on top of the reactor sprays the liquid onto the inner surface of the

cylindrical reactor, where gravity flow transports it down through the inner wall and out of the system via a pneumatic valve that leads back to the feeding tank. The UV irradiation is provided by Sylvania UV-visible and Philips UV-A fluorescent lamps, which are arranged parallel to the horizontal axis with a gap of 5 centimeters between them. The UV incident photon flux is maintained at around its solar equivalent level, with the average energy levels of UV-A and UV-visible light being 3.52 eV and 2.43 eV, respectively, as per the Planck constant h equivalent light necessary for photoexcitation. Accordingly, the UV-A and UV-visible irradiation levels are set at 2.20 and 3.30 mw cm^{-2} , respectively (measured by universal UV radiometer). The distance between the UV light and the plexi-glass reactor is 32 cm, and the back side of the plexi-glass reactor is subject to an average UV-A irradiation of 1.95 and an average UV-visible irradiation of 2.80 mw cm^{-2} (based on the average value of measurements made at 5 different vertical points). The total irradiated wet surface area of the plexi-glass reactor is calculated to be approximately 0.24 m^2 . The system is capable of providing a flow rate of 60 L/hour and can be operated in two modes: continuous recirculating flow with internal surface spraying and simultaneous discharge or batch mode, where the inner surface of the cylindrical plexi-glass reactor is filled by spraying and then completely discharged. Considering the cylindrical surface area of the reactor, the velocity of flow is calculated to be 0.05 m s^{-1} , which is less than the average velocity of a stagnant stream flow, assumed to be 0.4 m s^{-1} .



Figure 1. Pilot plant photocatalysis reactor

In the batch mode of operation, the cylindrical reactor is filled up to 90% of its capacity and the liquid is allowed to flow out of the hole at the bottom of the tube under the force of gravity. The flow rates of feeding and discharging are nearly equal.

2.1.5 Ensuring sterile conditions

Before each experimental trial, the entire pilot plant system, including the photoreactor in contact with the liquid, was subjected to a sterilization process using a 70% ethyl alcohol solution, which was circulated within the system for 20 minutes duration. Subsequently, the photoreactor was rinsed with distilled water and left to dry under sunlight conditions. Microbial growth during the sterilization and drying cycle of the system was evaluated through periodic microbial contamination tests conducted during the experimental studies.

2.1.6 Determination of the sub-lethal photocatalysis conditions and bacteria inactivation levels

To investigate the effects of sub-lethal photocatalysis on bacterial activity, donor and recipient bacterial strains were diluted in 0.8% NaCl solution to their initial concentrations of $3.0\text{-}5.5 \times 10^8$ colony-forming unit (CFU) mL^{-1} and added to a 20 L feeding tank [23,38]. The photocatalysis process was conducted with minimal amounts of photocatalyst and reactive oxygen species (ROS), but for a sufficient duration to observe the effects of oxidative stress on bacterial cells and ARG transfer mechanisms (180 minutes). During the optimization phase, process parameters were adjusted, and the photocatalyst dose was set between 0.100 to 0.800 g L^{-1} .

In order to evaluate bacterial viability following photocatalytic treatment, liquid bacterial samples were obtained, and agar dilution and streak plate methodologies were employed. Each sample was streaked on three types of selective agar plates containing corresponding antibiotics including i) (200 $\mu\text{g/mL}$) streptomycin containing agar plates for counting St R⁺ ATCC 33694 strain, ii) ampicillin (100 $\mu\text{g/mL}$), kanamycin (50 $\mu\text{g/mL}$), tetracycline (16 $\mu\text{g/mL}$) containing agar plates for counting Kan R⁺, Amp R⁺, Tet R⁺ *E. coli* J-53 (DSM-3876) strain and iii) agar plates containing both ampicillin (100 $\mu\text{g/mL}$), kanamycin (50 $\mu\text{g/mL}$), tetracycline (16 $\mu\text{g/mL}$) plus (200 $\mu\text{g/mL}$) streptomycin antibiotics for counting the Kan R⁺, Amp R⁺, Tet R⁺, St R⁺ multi resistant strain. This way the donor, recipient, and conjugated strains could be counted separately [45,46]. The bacterial culture technique and serial dilutions of the reaction solution were prepared using a sterile 0.8% (w/w%) NaCl aqueous solution. The bacterial culture technique was performed in triplicate, and the minimum detectable colony number was approximately 2–3 CFU mL^{-1} . After incubation at 37 °C for 20–24 h, bacterial viable counts were determined by enumerating the colonies.

2.1.7 Assessment of ARG transfer frequencies

The primary objective of this study was to experimentally verify the transfer of resistance genes from a donor strain to a recipient strain through plasmid RP4 [40,41]. To compare and evaluate the occurrence and frequency of conjugative

antibiotic resistance gene transfer, the following experimental scenarios were investigated;

I) individual donor or recipient strains treated with photocatalysis (PC) and then mated with the untreated strain, and

II) samples collected during simultaneous exposure of both strains to PC treatment. To enable comparative evaluation, reference studies were replicated under UV-A, UV-vis only, and photocatalyst only conditions [42,47].

Considering the conjugative gene transfer; for *E.coli* the donor: recipient ratio was not found to play a decisive role in conjugative transfer frequency while conjugative transfer frequencies did not exhibit significant alterations when the initial bacteria concentrations $> 10^5$ CFU mL⁻¹ [22]. The donor: recipient ratio parameter was set as 1:1, and initial bacterial concentrations as 10^8 CFU mL⁻¹ keeping values at comparable levels to that referenced from recent literature findings [23,38][48]. The mating duration has been set between 4-24 hours during optimization studies.

Studies were carried out based on the pre-determined sub-lethal process conditions that may provide reproducible bacteria inactivation kinetics (as can be seen in Figure 4). The initial bacteria concentration was set as $1.2-2.5 \times 10^8$ CFU mL⁻¹. Individual bacterial cell suspensions are taken from the feeding tank as a function of the PC process duration and subjected to the conjugative gene transfer assessment (the mating protocol). 1 mL samples were added to the 9 mL Luria Bertani broth keeping volumetric donor/recipient ratio as 1:1, and incubated for 20 hours at 37 °C conditions. Prior to serial dilution, 100 uL aliquots were plated on Luria Bertani agars (as triplicates) containing related antibiotics. Recipients were determined by streaking onto LB plates with 200 ug L⁻¹ streptomycin. Conjugants were determined by streaking onto LB plates with 100 ug L⁻¹ ampicillin, 50 ug L⁻¹ kanamycin, 16 ug L⁻¹ tetracycline and 200 ug L⁻¹ streptomycin [23,42,45,46].

Bacteria suspension of both donor and recipient strains at pre-set initial concentration were gently circulated within the reactor in the absence of photocatalyst, representative of the reference conditions. The enumeration results were used in the calculation of average colony counts (CFU mL⁻¹) from duplicate plates. Differences in colony counts across replicate experiments remained below %8. The limit of detection for the plating assay was 10 CFU mL⁻¹. The effect of each individual strain exposure to PC treatment (donor or strain) on conjugative gene transfer has been determined based on the frequency of conjugative transfer value that was calculated as = number of transconjugants (CFU mL⁻¹) / number of recipient cells (CFU mL⁻¹) [38,39].

2.1.8 Experimental

The experimental design consisted of several steps: firstly, sub-lethal photocatalytic (PC) conditions were determined by optimizing the PC dose and process duration based on the rate of bacteria inactivation [2,38]. The photocatalyst nanoparticles/nanocomposites were then added to a bacterial suspension with an initial concentration of $1.2-2.5 \times 10^8$ CFU mL⁻¹ at concentrations ranging from 100 to 800 mg L⁻¹. The weighed amount of photocatalyst was ultrasonicated for 10

minutes in distilled water before being added to the feeding tank and magnetically stirred during the experiments. The pH was maintained at 6.8. Samples were taken at various time intervals throughout the process duration and enumerated using an agar dilution and streak plate procedure to determine the number of surviving bacteria in CFU mL⁻¹ units.

To assess the effect of photocatalytic oxidation on conjugative gene transfer during the simultaneous exposure of both donor and recipient strains, a mixture of *E. coli* ATCC33694 recipient strain and *E. coli* DSM3876 donor strain in a 9:1 ratio was used [46]. The ten-fold excess was used to provide suitable conjugative pair formation conditions comparable to recent literature findings. The total number of enumerated transconjugants was expressed as a percentage against the total number obtained in the no-treatment reference conditions. One mL sample were taken along the PC process duration and subjected to the conjugative gene transfer assessment protocol.

3 Results and discussion

3.1 Material characterization

Mainly the characterization results are briefly summarized with refer to the previous study comparing different NCs regarding their photocatalytic activities and bacteria inactivation potentials [44]. The physical attributes of a sample can be characterized by its morphology, which describes its surface area structure. The CFT-GO nanocomposite exhibits a mesoporous structure with a narrow distribution of pore sizes, affording high adsorption capacities ($35.2 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ BET, $390 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ Langmuir) [44].

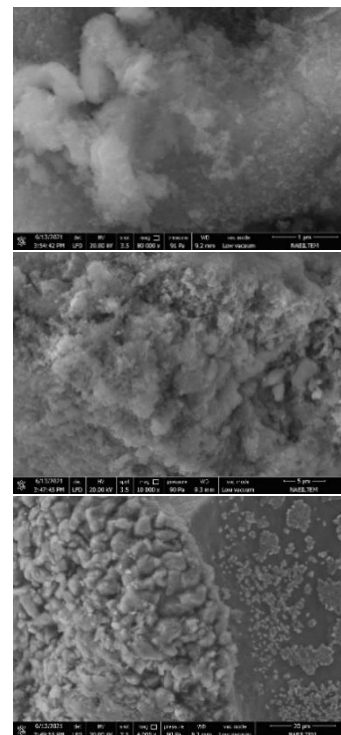


Figure 2. SEM analysis results of CFT-GO 3% nanocomposite

Nitrogen adsorption-desorption measurements revealed an average pore size of 13.9 μm . Additionally, the grain size was determined to be 75 nm based on XRD analysis and the application of the Scherrer equation, as it was recently reported [44].

The diffuse reflectance analysis was employed to evaluate the reduced band gap of CFT-GO. The role of free excitation energy of the bandgap on the bacteria inactivation potential of graphene-oxide supported nanocomposites was examined using photoluminescence analysis. The visible light absorption shifts resulting from the addition of graphene-oxide into the nanocomposite were analyzed with the help of Diffuse reflectance analysis. A previous study presented a comprehensive description of the characterization results [44].

3.2 Bacteria inactivation kinetics – determining the sub-lethal photocatalysis conditions)

In the experimental conditions investigated, the photocatalytic (PC) process under continuous mode of operation using CFT-GO (carbon felt supported titanium dioxide-graphene oxide) photocatalyst was capable of maintaining sub-lethal conditions for 180 minutes at an initial concentration of 200 mg L^{-1} (Figure 3). Upon exposure to UV-vis irradiation, a significant level of inactivation (2 logarithmic reduction) was achieved, with the inactivation profile being evenly distributed throughout the process and not featuring any distinct logarithmic reduction phase [23,49]. It was found that at higher doses of 600 and 800 mg L^{-1} , the CFT-GO-based UV-vis driven photocatalysis resulted in removal rates of >5 logarithms. A comparison with the relevant literature revealed that a >4 logarithmic reduction was reported in a CPC flow-through reactor and that an optimum TiO_2 concentration of 0.200 g L^{-1} was identified for efficient bacteria inactivation in a CPC system. During the re-circulating continuous mode of operation, the initial delay (that is represented by the shoulder behavior) in the inactivation profile gradually decreases with increasing PC dose (Figure 3).

During the re-circulating continuous mode of operation, the initial delay in the inactivation profile, as represented by the shoulder behavior, gradually diminishes with an increase in the PC dose (as shown in Figure 3). At higher initial concentrations of PC, the logarithmic phase of inactivation becomes evident, and the inactivation rates gradually increase over time, similar to the findings reported with Mn-doped TiO_2 photocatalyst in a batch reactor and TiO_2 photocatalysts in a flow-through CPC reactor (as reported in [50,51]). Several studies have demonstrated that for high PC concentrations, the efficiency of the process decreases due to the shielding effect that inhibits ROS formation [52]. However, this effect is considerably less pronounced in the continuous re-circulating mode of operation. Theoretically, in this mode of operation, the liquid is fed into the reactor as a thin layer, with the photocatalyst and bacteria homogeneously mixed within the liquid that flows down through the inner wall of the reactor. The liquid layer is directly exposed to UV irradiation, and the photocatalysis process is carried out more efficiently. Reproducible

individual PC bacteria inactivation rates were obtained for donor, recipient, and mated (transconjugant) strains (as shown in Figure 5).

3.3 Effect of photocatalyst type and the mode of operation on bacteria inactivation kinetics

A comparative evaluation of PC bacteria inactivation by CFT-GO and TiO_2 under two different modes of operation was carried out. The hole oxidation mechanism on the CFT-GO surface adsorbed cells may have resulted in a higher level of bacterial inactivation compared to TiO_2 -UV-A based photocatalysis. However, in batch mode, the solution becomes opaque as a result of the heterogeneous photocatalysis conditions where the photocatalyst and the reactants are in separated phases. As a result, UV irradiation can not effectively penetrate through the liquid, which may hinder the PC process rates. The shielding effect is more apparent under these conditions. Real wastewater matrixes might require higher UV energy due to absorption and shielding of UV-energy by naturally occurring wastewater constituents and photocatalysts [29,53].

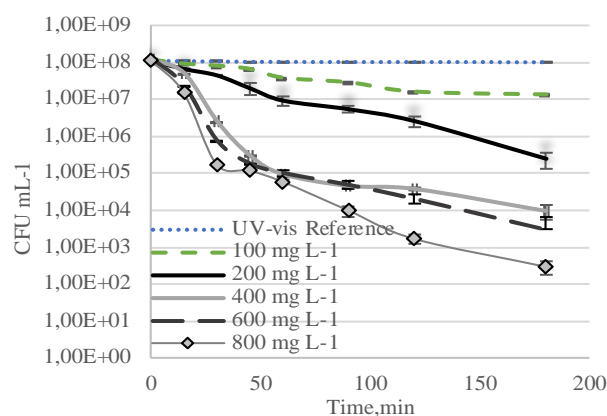


Figure 3. Effect of initial CFT-GO PC concentration on bacteria inactivation rates $[C]_0 \text{ bacteria: } 10^8 \text{ CFU mL}^{-1}$

A continuous re-circulating mode of operation has advantages such as overcoming UV energy limitations, resulting in simultaneous and more efficient photocatalyst activation, generation of ROS species, and bacteria inactivation mechanisms occurring in a unit volume of bacteria-photocatalyst suspension. TiO_2 -UV-A based PC resulted in an initial delay and post delay in the bacteria inactivation profile that was more spread over time than UV-vis driven CFT-GO photocatalysis, with a limited LOG inactivation phase, ending up with a total 1 LOG removal. On the other hand, CFT-GO based photocatalysis resulted in 2 LOGs of removal, with the bacteria inactivation profile in batch mode being more subject to initial delays and spread over time, with inactivation rates reaching a maximum of 1.5 LOG for both TiO_2 -UV-A and CFT-GO-UV visible driven photocatalysis (Figure 4). The findings are comparable with those obtained for sub-lethal oxidative conditions provided by UV-vis driven 50 mg L^{-1} nano sphalerite and UV365 nm driven TiO_2 of 100 mg L^{-1} photocatalysis [23,49]. According to literature comparison, there were no variations regarding

bacterial strain resistance to photocatalytic induced oxidative stress conditions between acquired resistance of laboratory strains or natural strains from the same type carrying different ARGs [54,55].

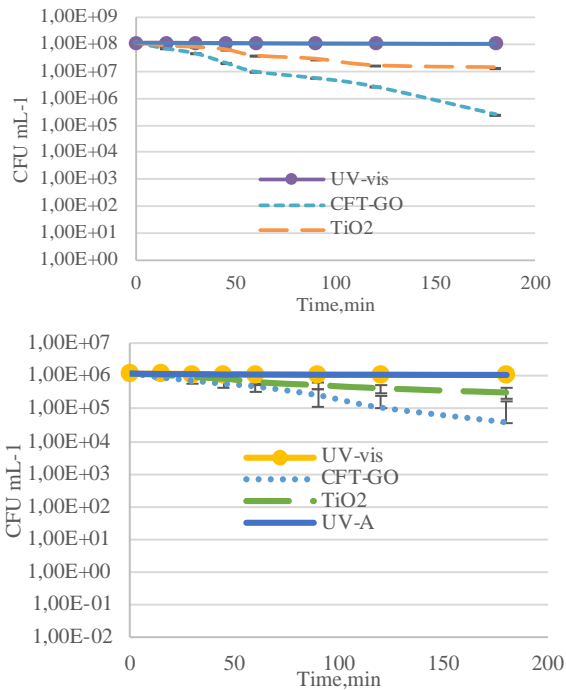


Figure 4. Rate of photocatalytic bacteria inactivation with CFT-GO, and TiO₂ photocatalysts and at reference conditions a) Continuous and b) Batch mode of operation pH: 6.8, [C]PC = 0.200 g L⁻¹

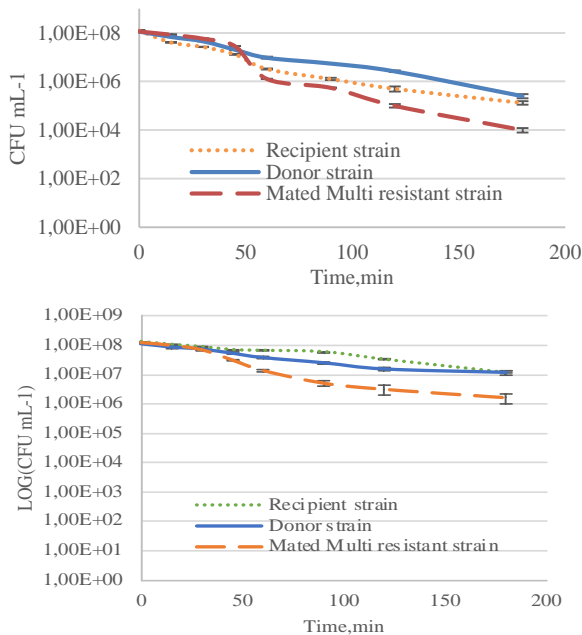


Figure 5. PC bacteria inactivation profiles of individual bacterial strains under a) UV-vis driven CFT-GO photocatalysis and b) UV-A driven TiO₂ photocatalysts, at continuous mode of operation, pH: 6.8, [C]PC = 0.200 g L⁻¹

3.4 Effect of photocatalyst type and the mode of operation on bacteria inactivation kinetics

The present study aimed to investigate the potential of *E.coli* DSM 3876 and *E.coli* ATCC33694 strains for RP4 plasmid-mediated conjugative gene transfer, based on preliminary experiments. The results indicated that successful gene transfer occurred between the two strains. To determine the optimal mating duration, the number of trans-conjugants formed was assessed at various time points. The findings showed that a mating duration of 20 hours yielded the highest number of trans-conjugants, which is consistent with previous studies. Consequently, a total mating duration of 20 hours was adopted for the subsequent evaluation of conjugative transfer (Figure 6) [49].

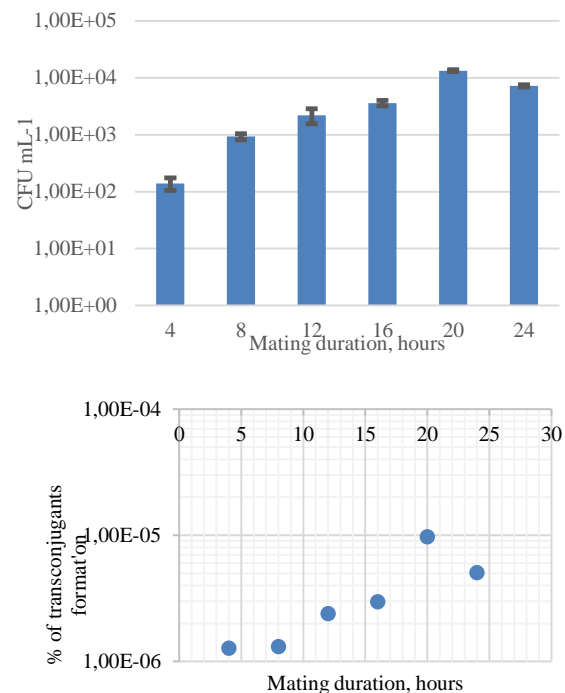


Figure 6. Effect of mating time on the conjugative transfer from *E. coli* DSM3876 (donor strain) to *E. coli* ATCC33694 (recipient strain). Donor: Recipient ratio set as 1:1, [C]₀= 108 CFU mL⁻¹.

In the absence of a limiting factor for recipient cells during conjugation, the availability of donor cells was increased by inducing cell permeability through the generation of intracellular reactive oxygen species (ROS). When intact recipient cells were exposed to photocatalytic (PC) oxidation before mating with donor cells, both the frequency and the number of transconjugants increased up to 60 minutes of process duration, after which they remained stable and followed a decreasing trend (as illustrated in Figure 7). Conversely, when recipient cells were mated with intact donor cells, the frequency of conjugative transfer increased following 90 minutes of photocatalysis process duration. The total number of transconjugants initially increased sharply, then declined and eventually stabilized at 1-2 x 10² CFU mL⁻¹. Unlike previous findings in the literature, the decline in conjugative transfer cannot be

attributed solely to loss of bacterial viability. The PC-mediated bacterial inactivation was carried out under sub-lethal conditions, allowing for continuous stress response in bacteria during the process duration [38,49]. Literature suggests that recipient-induced scenarios play a more significant role in assessing changes in the conjugative gene transfer caused by the applied treatment processes. Accordingly, as shown in Figure 7, both the frequency and absolute abundance of trans-conjugants following the PC process in continuous mode of operation remained significantly lower than the values obtained in batch mode of operation [22,23,38].

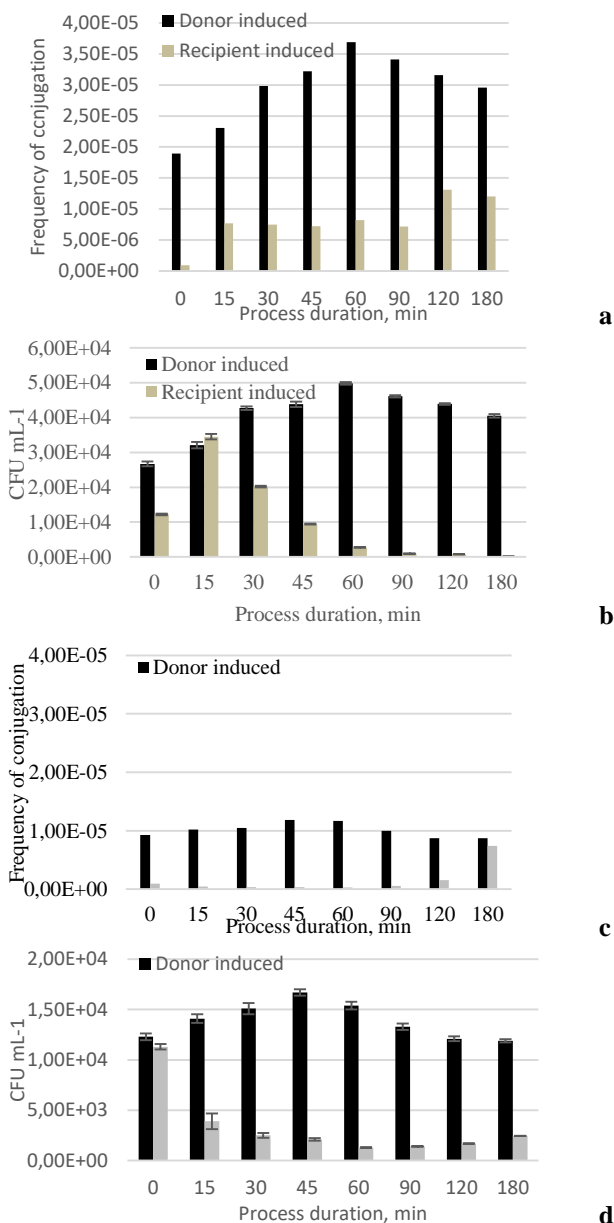


Figure 7. Effect of CFT-GO UV-vis PC induced donor and recipient strains on the a-c) conjugative transfer frequencies and b-d) total number of transconjugants formation. UV-vis: 3.30 mw cm², pH: 6.8, [C]_{PC}= 0.200 g L⁻¹ under(a-b) continuous re-circulating – c,d) batch modes of operation.

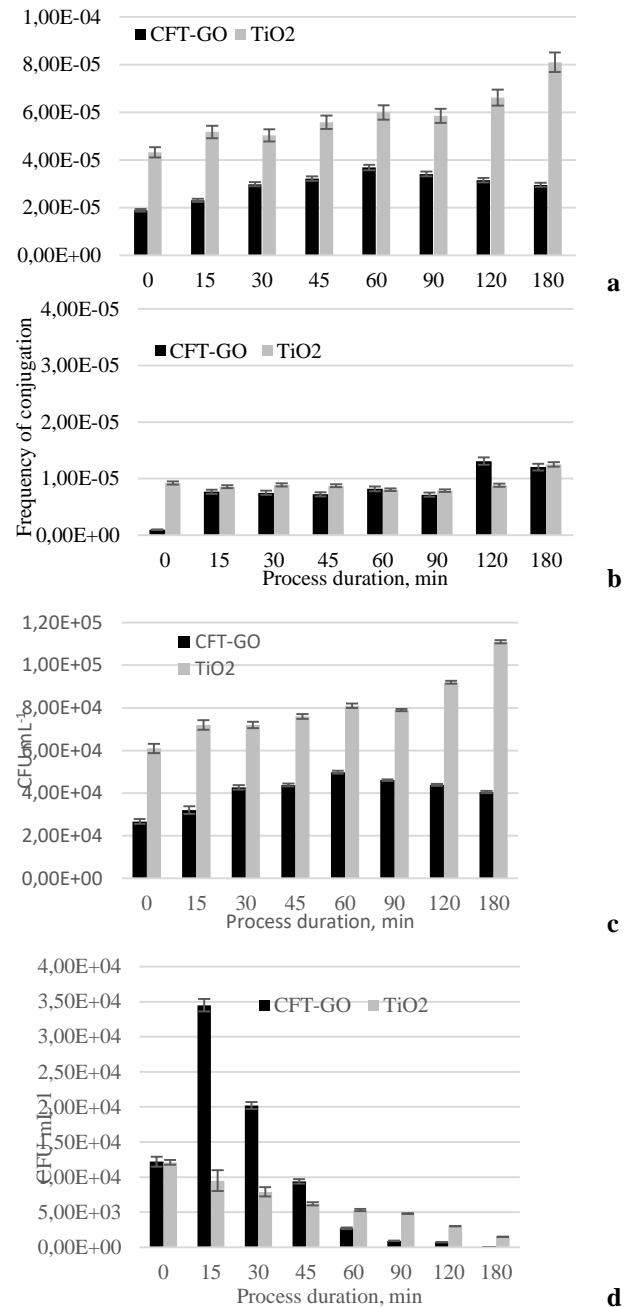


Figure 8. Effect of CFT-GO UV-vis and TiO₂-UV-A based photocatalytic oxidation on the conjugative transfer frequencies, and the number of trans-conjugants formation (notated as a-c: donor induced, b-d: recipient induced. UV-A irradiation: 2.20 mw cm⁻¹, UV-vis: 3.30 mw cm⁻¹, pH: 6.8, [C]_{PC}= 0.200 g L⁻¹ under continuous re-circulating mode of operation.

In the comparative analysis of the impact of two photocatalysts on conjugative transfer, it was observed that the inhibition effect of TiO₂-based UV-A driven photocatalytic oxidation was limited in comparison to that of CFT-GO nanocomposite. The observed difference could be attributed to the differences in the extent and nature of

bacterial cell damage mechanisms induced by the two photocatalysts, as depicted in Figure 8.

Comparing, photocatalytic oxidation mechanism of two photocatalysts on the donor bacteria; exposure to a lower concentration of reactive oxygen species (ROS), and limited level of surface interactions between the photocatalyst and bacterial cells may bring along the differences observed with use of TiO₂. However, in the case of CFT-GO nanocomposite, the hydrophobic-hydrophilic transition of UV-irradiated graphene oxide may have enhanced the adhesion and facilitated the effect of hole oxidation mechanism on surface-adsorbed bacterial cells, also including cells in suspension form. The surface properties, dominant ROS formation, and bacterial cell oxidation pathways of highly porous reduced graphene-oxide foams in the presence of peroxymonosulfate were discussed in detail in a previous study [56], where the partial restoration of p-p conjugation within graphene sheets was also discussed. The study reported that the CFT-GO nanocomposite had graphite layer defects, including C disorders [44].

Previous research has reported similar results in utilizing photocatalytic inactivation techniques with TiO₂&Ag nanocomposites incorporating graphene-oxide, which have demonstrated limited effects on promoting antibiotic resistance gene (ARG) transfer [42]. More recent investigations have shown that highly porous reduced graphene-oxide with improved adsorptive and photocatalytic properties can enhance the photocatalytic treatment of antibiotic-resistant bacteria (ARB) and control ARG dissemination properties [29,42,57,58]. Additionally, another study proposed that the transfer of graphene-oxide-mediated ARGs could be affected by the reduction pathway of the nanomaterial [39].

When both donor and recipient strains are exposed to photocatalytic oxidation simultaneously, it leads to variations in both the rates of inactivation and formation of trans-conjugants compared to untreated conditions (Figure 9a, 9b). This is due to sub-lethal oxidative stress induced by photocatalytic oxidation, which enhances the transfer of antibiotic resistance genes (ARGs) during conjugation, while at the same time, the high adsorption capacity and adhesive surface interactions of CFT-GO with bacterial cells inhibit conjugation [2,26,59].

The incorporation of mesoporous CFT-GO nanocomposite and its high BET surface area exhibit advanced adhesive properties leading to increased rates of bacteria inactivation. Literature reports demonstrate that lower CFT nanocomposite doses result in higher photocatalytic activity, while the addition of varying doses of GO into the nanocomposite leads to increased bacteria inactivation rates (e.g. CFT-GO 3% and CFT-GO 1% exhibited higher rates of bacteria inactivation compared to TiO₂-based photocatalysis with k values of 3.43, 1.54, and 0.66, respectively, according to the HOM model) [44].

In this study, the adsorption capacity of the mesoporous CFT-GO nanocomposite limits the possibility of random pairings of donor and recipient strains in the aquatic environment, thereby limiting the increase in conjugative transfer. During the early stages (0-30 min) of PC treatment,

the conjugative transfer is under adsorption limiting conditions and PC inactivation rates are high, while between 45-60 minutes, lower PC inactivation rates are observed and conjugative transfer is still limited due to the inhibiting effect of the CFT-GO nanocomposite photocatalyst. Between 90-120 minutes, high PC inactivation rates and possible desorption of adsorbed bacterial cells and extra-cellular genetic material result in the enhancement of conjugative transfer. At the end of 180 minutes, the percentage of mated pairs compared to the no-treatment conditions shows a significant decrease due to the depletion of recipient strains and a general reduction in the total number of bacteria cells (CFU mL⁻¹). Bacterial adsorption near photocatalytic sites not only favors efficient bacteria inactivation but also has the potential to promote the extracellular ARGs capturing and degradation mechanism. Thus, the GO-based photocatalyst may mitigate the HGT mechanism by transformation besides its physical barrier function between the surface-adsorbed donor and recipient strains. On the other hand, a delay in the onset of the gene pair conjugates was evident for the batch mode of operation (in accordance with the obtained PC bacteria inactivation rates) compared to the continuous mode (Figure 9).

Recent literature findings suggest that the increased affinity between bacteria and nitrogen-doped reduced graphene-oxide (NrGO) is attributed to the enhanced hydrophobic interactions between the photocatalyst surface and bacterial surface proteins [29]. The state of stress response and vitality of bacteria are critical factors in determining the conjugative transfer of antibiotic resistance genes (ARGs) [37]. During visible light-driven photocatalysis, prolonged exposure may increase the conjugative transfer rates due to long-term vitality of bacteria [38]. In a pioneering study, the transfer mechanisms of resistance genes between K12-susceptible and J53-rifampicin-resistant strains of *E. coli* bacterial cells (which were damaged but not completely inactivated under oxidative conditions created by the FK process) were investigated in distilled water and secondary treatment effluent environments. The study reports that the oxidative stress level of *E. coli* and the formation rate of conjugated gene pairs are reduced due to the reactive oxygen species (ROS) scavenging activity of the organic and inorganic components in the secondary treatment effluent, which is described as the mechanism of suppressing horizontal gene transfer (HGT) [46].

In this study, a maximum increase of 2.5-fold in the number of transconjugants was observed during photocatalytic oxidation, and this percentage remained below 1 by the end of the process duration, in comparison to the reference conditions where no treatment was applied (Figure 9). Since the study was conducted in a distilled water matrix, no ROS scavenger or favorable conditions for bacterial regrowth were present. The adhesion mechanism may have played a significant role in the interactions and contact between donor and recipient bacterial strains, preventing gene transfer channels and thus inhibiting the conjugative mechanism [34,39,42]. The unique lamellar structure and high adsorption properties of GOs could encase

bacterial cells and prevent the cell exchange mechanism with the external environment.

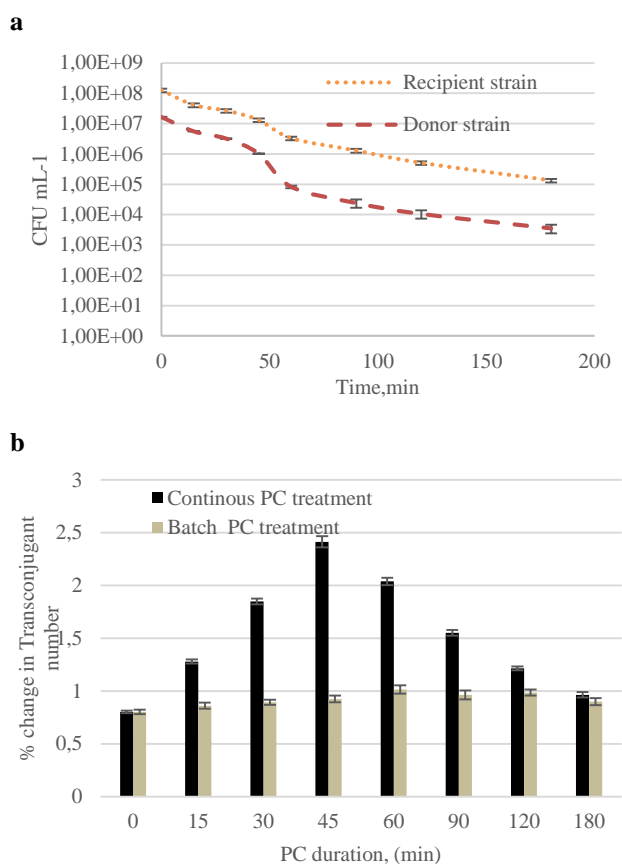


Figure 9. a) Bacteria inactivation and b) increase percentages of number of transconjugant strains during simultaneous exposure of donor and recipient strains to CFT-GO UV-vis PC under continuous mode of operation, Donor: Recipient ratio set as 9:1, $[C]_0$ bacteria: 10^8 CFU mL⁻¹

4. Conclusion

The utilization of a UV-vis driven photocatalyst based on Graphene-oxide Ti-CuFe₂O₄ under sub-lethal photocatalytic conditions demonstrated enhanced bacterial inactivation and reduced conjugative gene transfer compared to reference UV-A TiO₂. For advanced oxidation processes to gain wider acceptance and be implemented at a larger scale, it is crucial to understand their impact on the mechanism of ARG propagation. The mode of process operation was observed to have a significant effect on the vitality of recipient cells, with the continuous mode of operation mitigating the transfer of ARGs and leading to a drastic decrease in the total number of cultivable bacteria cells following exposure to the CFT-GO based photocatalysis. However, it should be noted that the possibility of ARG exchange via natural transformation was not considered in this study, and further research is needed to simultaneously analyze both aspects of ARG transfer at the molecular scale. Experiments in natural water matrices and/or representative conditions have the utmost importance for large-scale applications to become

widespread. In order to achieve effective bacterial inactivation and control of ARGs, it is recommended to consider the reactor configuration and operating regime in photocatalysis, in addition to the selection of the appropriate photocatalyst.

Acknowledgement

As the author of the study, I would like to acknowledge Prof. Dr. Ayten Yazgan Karataş from İstanbul Technical University, Department of Molecular Biology and Genetics and Prof. Dr. İdil Arslan Alaton from İstanbul Technical University, Department of Environmental Engineering for their support.

Data Availability

The datasets generated during and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Funding

Authors would like to thank TNKU Scientific Research Projects Funding Office for the support within the research project NKUBAP.06.GA.21.343.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Declaration of interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity Rate: 15%.

References

- [1] A. Catalano, D. Iacopetta, J. Ceramella, D. Scumaci, F. Giuzio, C. Saturnino, S. Aquaro, C. Rosano, M.S. Sinicropi, Multidrug Resistance (MDR): A widespread phenomenon in pharmacological therapies, *Molecules*, 27, 2022. doi:10.3390/molecules27030616.
- [2] Y. Zhang, A.Z. Gu, M. He, D. Li, J. Chen, Subinhibitory concentrations of disinfectants promote the horizontal transfer of multidrug resistance genes within and across genera, *Environ. Sci. Technol.*, 51, 570–580, 2017. doi:10.1021/acs.est.6b03132.
- [3] I. Michael, L. Rizzo, C.S. Mc Ardell, C.M. Manaia, C. Merlin, T. Schwartz, C. Dagot, D. Fatta-Kassinos, Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review, *Water Res.*, 47, 957–995, 2013. doi:10.1016/j.watres.2012.11.027.
- [4] C.B. Özkal, 11 Control of antibiotic resistance by advanced treatment: recent advances, in a nutshell, *Environ. Microbiol. Emerg. Technol.*, 265, 2022.
- [5] P.Y. Hong, T.R. Julian, M.L. Pype, S.C. Jiang, K.L. Nelson, D. Graham, A. Pruden, C.M. Manaia, Reusing treated wastewater: Consideration of the safety aspects associated with antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes, *Water*, 10, 2018. doi:10.3390/w10030244.

- [6] D.-W. Kim, C.-J. Cha, Antibiotic resistome from the One-Health perspective: understanding and controlling antimicrobial resistance transmission, *Exp. Mol. Med.*, 53, 301-309, 2021.
- [7] J. Davies, Inactivation of antibiotics and the dissemination of resistance genes, *Science*, 264, 375–382, 1994.
- [8] R. Jayaraman, Antibiotic resistance: an overview of mechanisms and a paradigm shift, *Curr. Sci.*, 1475–1484, 2009.
- [9] M.P. Nikolich, G. Hong, N.B. Shoemaker, A.A. Salyers, Evidence for natural horizontal transfer of tetQ between bacteria that normally colonize humans and bacteria that normally colonize livestock., *Appl. Environ. Microbiol.*, 60, 3255–3260, 1994.
- [10] A. Goulas, B. Livoreil, N. Grall, P. Benoit, C. Couderc-Obert, C. Dagot, D. Patureau, F. Petit, C. Laouénan, A. Andremont, What are the effective solutions to control the dissemination of antibiotic resistance in the environment? A systematic review protocol, *Environ. Evid.* 7, 1–9, 2018. doi:10.1186/s13750-018-0118-2.
- [11] F. Barancheshme, M. Munir, Strategies to combat antibiotic resistance in the wastewater treatment plants, *Front. Microbiol.* 8, 2018. doi:10.3389/fmicb.2017.02603.
- [12] E. Jamrozik, M. Selgelid, Ethics and drug resistance: collective responsibility for global public health, 2020.
- [13] K. Liguori, I. Keenum, B.C. Davis, J. Calarco, E. Milligan, V.J. Harwood, A. Pruden, Antimicrobial resistance monitoring of water environments: A framework for standardized methods and quality control, *Environ. Sci. Technol.* 56, 9149–9160, 2022.
- [14] C.U. Schwermer, P. Krzeminski, A.C. Wennberg, C. Vogelsang, W. Uhl, Removal of antibiotic resistant *E. coli* in two Norwegian wastewater treatment plants and by nano- and ultra-filtration processes, *Water Sci. Technol.* 77, 1115–1126, 2018. doi:10.2166/wst.2017.642.
- [15] G. Ferro, F. Guarino, A. Cicatelli, L. Rizzo, β -lactams resistance gene quantification in an antibiotic resistant *Escherichia coli* water suspension treated by advanced oxidation with UV/H₂O₂, *J. Hazard. Mater.* 323 426–433, 2017. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.03.014.
- [16] M. Jin, L. Liu, D. Wang, D. Yang, W. Liu, J. Yin, Z. Yang, H. Wang, Z. Qiu, Z. Shen, Chlorine disinfection promotes the exchange of antibiotic resistance genes across bacterial genera by natural transformation, *ISME J.* 14, 1847–1856, 2020. doi: 10.1038/s41396-020-0656-9
- [17] J. Lu, Y. Wang, M. Jin, Z. Yuan, P. Bond, J. Guo, Both silver ions and silver nanoparticles facilitate the horizontal transfer of plasmid-mediated antibiotic resistance genes, *Water Res.*, 169, 2020. doi:10.1016/j.watres.2019.115229.
- [18] Z. Qiu, Z. Shen, D. Qian, M. Jin, D. Yang, J. Wang, B. Zhang, Z. Yang, Z. Chen, X. Wang, C. Ding, D. Wang, J.W. Li, Effects of nano-TiO₂ on antibiotic resistance transfer mediated by RP4 plasmid, *Nanotoxicology*. 9, 895–904, 2015. doi:10.3109/17435390.2014.991429.
- [19] S. Zhang, Y. Wang, H. Song, J. Lu, Z. Yuan, J. Guo, Copper nanoparticles and copper ions promote horizontal transfer of plasmid-mediated multi-antibiotic resistance genes across bacterial genera, *Environ. Int.* 129, 478–487, 2019. doi:10.1016/j.envint.2019.05.054.
- [20] S. Ghosh, Y. Chen, J. Hu, Application of UVC and UVC based advanced disinfection technologies for the inactivation of antibiotic resistance genes and elimination of horizontal gene transfer activities: Opportunities and challenges, *Chem. Eng. J.* 450, 2022. doi:10.1016/j.cej.2022.138234.
- [21] C. Kong, X. He, M. Guo, S. Ma, B. Xu, Y. Tang, The Impacts of Chlorine and Disinfection Byproducts on Antibiotic-Resistant Bacteria (ARB) and Their Conjugative Transfer, *Water*, 14, 2022. doi:10.3390/w14193009.
- [22] X. Chen, H. Yin, G. Li, W. Wang, P.K. Wong, H. Zhao, T. An, Antibiotic-resistance gene transfer in antibiotic-resistance bacteria under different light irradiation: Implications from oxidative stress and gene expression, *Water Res.* 149, 282–291, 2022. doi:10.1016/j.watres.2018.11.019.
- [23] H. Ji, Y. Cai, Z. Wang, G. Li, T. An, Sub-lethal photocatalysis promotes horizontal transfer of antibiotic resistance genes by conjugation and transformability, *Water Res.*, 221, 2022. doi:10.1016/j.watres.2022.118808.
- [24] R.K. Manoharan, F. Ishaque, Y.H. Ahn, Fate of antibiotic resistant genes in wastewater environments and treatment strategies - A review, *Chemosphere.*, 298, 2022. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.134671.
- [25] M.C. Maria, R.P. d. Mendonça Neto, G.F.F. Pires, P.B. Vilela, C.C. Amorim, Combat of antimicrobial resistance in municipal wastewater treatment plant effluent via solar advanced oxidation processes: Achievements and perspectives, *Sci. Total Environ.* 786, 2021. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147448.
- [26] I. Michael-Kordatou, P. Karaolia, D. Fatta-Kassinou, The role of operating parameters and oxidative damage mechanisms of advanced chemical oxidation processes in the combat against antibiotic-resistant bacteria and resistance genes present in urban wastewater, *Water Res.* 129, 208–230, 2018. doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.007
- [27] G. Mamba, A. Mishra, Advances in magnetically separable photocatalysts: Smart, recyclable materials for water pollution mitigation, *Catalysts*, 2016. doi:10.3390/catal6060079.
- [28] N.R. Khalid, A. Majid, M.B. Tahir, N.A. Niaz, S. Khalid, Carbonaceous-TiO₂ nanomaterials for photocatalytic degradation of pollutants: A review, *Ceram. Int.* 43, 14552–14571, 2022. doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.08.143
- [29] D. Li, P. Yu, X. Zhou, J.H. Kim, Y. Zhang, P.J.J. Alvarez, Hierarchical Bi₂O₂CO₃ wrapped with modified graphene oxide for adsorption-enhanced photocatalytic inactivation of antibiotic resistant

- bacteria and resistance genes, *Water Res.*, 184, 2020. doi:10.1016/j.watres.2020.116157.
- [30] H. Wang, X. Li, Q. Ge, Y. Chong, Y. Zhang, A multifunctional Fe₂O₃@MoS₂@SDS z-scheme nanocomposite: NIR enhanced bacterial inactivation, degradation antibiotics and inhibiting ARGs dissemination, *Colloids Surfaces B Biointerfaces.*, 219, 2022. doi:10.1016/j.colsurfb.2022.112833.
- [31] K.K. Kefeni, B.B. Mamba, Photocatalytic application of spinel ferrite nanoparticles and nanocomposites in wastewater treatment: Review, *Sustain. Mater. Technol.* 23, 2020. e00140. doi:10.1016/j.susmat.2019.e00140.
- [32] R. Kodasma, B. Palas, G. Ersöz, S. Atalay, Photocatalytic activity of copper ferrite graphene oxide particles for an efficient catalytic degradation of Reactive Black 5 in water, *Ceram. Int.*, 46, 6284–6292, 2020. doi:10.1016/j.ceramint.2019.11.100.
- [33] Q. Jiang, M. Feng, C. Ye, X. Yu, Effects and relevant mechanisms of non-antibiotic factors on the horizontal transfer of antibiotic resistance genes in water environments: A review, *Sci. Total Environ.*, 806, 2022. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150568.
- [34] P. Karaolia, I. Michael-Kordatou, E. Hapeshi, C. Drosou, Y. Bertakis, D. Christofilos, G.S. Armatas, L. Sygellou, T. Schwartz, N.P. Xekoukoulotakis, Removal of antibiotics, antibiotic-resistant bacteria and their associated genes by graphene-based TiO₂ composite photocatalysts under solar radiation in urban wastewaters, *Appl. Catal. B Environ.*, 224, 810–824, 2018. doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.020
- [35] K. Yu, F. Chen, L. Yue, Y. Luo, Z. Wang, B. Xing, CeO₂ nanoparticles regulate the propagation of antibiotic resistance genes by altering cellular contact and plasmid transfer, *Environ. Sci. Technol.* 54, 10012–10021, 2020. doi.org/10.1021/acs.est.0c01870
- [36] L. Shi, J. Chen, L. Teng, L. Wang, G. Zhu, S. Liu, Z. Luo, X. Shi, Y. Wang, L. Ren, The antibacterial applications of graphene and its derivatives, *Small.* 12, 4165–4184, 810–824, 2022. doi:10.1002/sml.201601841.
- [37] D. Xia, H. Liu, Z. Jiang, T.W. Ng, W.S. Lai, T. An, W. Wang, P.K. Wong, Visible-light-driven photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* K-12 over thermal treated natural magnetic sphalerite: Band structure analysis and toxicity evaluation, *Appl. Catal. B Environ.* 224, 541–552, 2018. doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.10.030
- [38] H. Yin, X. Chen, G. Li, W. Wang, P.K. Wong, T. An, Can photocatalytic technology facilitate conjugative transfer of ARGs in bacteria at the interface of natural sphalerite under different light irradiation, *Appl. Catal. B Environ.*, 287, 2021. doi:10.1016/j.apcatb.2021.119977.
- [39] Q. Zhang, X. Liu, H. Zhou, Y. Lu, Y. Fan, L. Wu, X. Xiao, Reduction pathway of graphene oxide affects conjugation-mediated horizontal gene transfer under environmental conditions, *Chem. Eng. J.* 450, 2022. doi:10.1016/j.cej.2022.138301.
- [40] M.A.S. Mc Mahon, I.S. Blair, J.E. Moore, D.A. McDowell, The rate of horizontal transmission of antibiotic resistance plasmids is increased in food preservation-stressed bacteria, *J. Appl. Microbiol.* 103, 1883–1888, 2007. doi:10.1111/j.1365-2672.2007.03412.x.
- [41] C.A. Woodall, *E. coli* Plasmid Vectors DNA Transfer by Bacterial Conjugation, *Methods Mol. Biol.*, 235, 61–65, 2003. doi.org/10.1385/1-59259-409-3:61
- [42] M.T. Guo, X.B. Tian, Impacts on antibiotic-resistant bacteria and their horizontal gene transfer by graphene-based TiO₂&Ag composite photocatalysts under solar irradiation, *J. Hazard. Mater.*, 380, 2019. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.120877.
- [43] C.B. Ozkal, S. Meric, Photocatalytic Bacteria Inactivation by TiO₂-Ag based Photocatalysts and the Effect on Antibiotic Resistance Profile, *Curr. Anal. Chem.*, 17, 98–106, 2021. doi.org/10.2174/1573411016999200711145845
- [44] C.B. Özkal, Synthesis of CuFe₂O₄-Ti and CuFe₂O₄-Ti-GO nanocomposite photocatalysts using green-synthesized CuFe₂O₄: determination of photocatalytic activity, bacteria inactivation and antibiotic degradation potentials under visible light, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 97(7), 1842–1859, 2022. doi.org/10.1002/jctb.7058
- [45] I.A. Alaton, A.Y. Karataş, Ö. Pehlivan, T.O. Hanci, Elimination of antibiotic resistance in treated urban wastewater by iron-based advanced oxidation processes, *Desalin. Water Treat.*, 172, 235–253, 2019. doi:10.5004/dwt.2019.24929.
- [46] P.S.M. Dunlop, M. Ciavola, L. Rizzo, D.A. McDowell, J.A. Byrne, Effect of photocatalysis on the transfer of antibiotic resistance genes in urban wastewater, *Catal. Today.*, 240, 55–60, 2015. doi:10.1016/j.cattod.2014.03.049.
- [47] D. Saha, M.C. Visconti, M.M. Desipio, R. Thorpe, Inactivation of antibiotic resistance gene by ternary nanocomposites of carbon nitride, reduced graphene oxide and iron oxide under visible light, *Chem. Eng. J.*, 382, 2020. doi:10.1016/j.cej.2019.122857.
- [48] H. Wang, J. Wang, S. Li, G. Ding, K. Wang, T. Zhuang, X. Huang, X. Wang, Synergistic effect of UV/chlorine in bacterial inactivation, resistance gene removal, and gene conjugative transfer blocking, *Water Res.*, 185, 2020. doi:10.1016/j.watres.2020.116290.
- [49] H. Yin, X. Chen, G. Li, Y. Chen, W. Wang, T. An, P.K. Wong, H. Zhao, Sub-lethal photocatalysis bactericidal technology cause longer persistence of antibiotic-resistance mutant and plasmid through the mechanism of reduced fitness cost, *Appl. Catal. B Environ.*, 245, 698–705, 2019. doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.01.041
- [50] Venieri, D.; Fragedaki, A.; Kostadima, M.; Chatzisyneon, E.; Binas, V.; Zachopoulos, A.; Kiriakidis, G.; Mantzavinos, D. Solar light and metal-doped TiO₂ to eliminate water-transmitted bacterial pathogens: Photocatalyst characterization and disinfection performance. *Appl Catal B* 2014, 154, 93–101, doi:10.1016/j.apcatb.2014.02.007.

- [51] Alrousan, D.M.A.; Dunlop, P.S.M.; McMurray, T.A.; Byrne, J.A. Photocatalytic inactivation of *E. coli* in surface water using immobilised nanoparticle TiO₂ films. *Water Res* 2009, 43, 47–54. doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.015
- [52] Mehrotra, K.; Yablonsky, G.S.; Ray, A.K. Kinetic Studies of photocatalytic degradation in a TiO₂ slurry system: Distinguishing working regimes and determining rate dependences. *Ind Eng Chem Res* 2003, 42, 2273–2281. doi.org/10.1021/ie0209881
- [53] P. Fernández-Ibáñez, C. Sichel, M.I. Polo-López, M. de Cara-García, J.C. Tello, Photocatalytic disinfection of natural well water contaminated by *Fusarium solani* using TiO₂ slurry in solar CPC photo-reactors, *Catal. Today.*, 144, 62–68, 2009. doi.org/10.1016/j.cattod.2009.01.039
- [54] T. Tsai, H. Chang, K. Chang, Y. Liu, A comparative study of the bactericidal effect of photocatalytic oxidation by TiO₂ on antibiotic-resistant and antibiotic-sensitive, *J. áChem. Technol. Biotechnol.*, 85.12, 1642–1653, 2010. doi:10.1002/jctb.2476.
- [55] V.M. Sousa, C.M. Manaia, A. Mendes, O.C. Nunes, Photoinactivation of various antibiotic resistant strains of *Escherichia coli* using a paint coat, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, 251, 148–153, 2013. doi:10.1016/j.jphotochem.2012.10.027.
- [56] M. Karbasi, F. Karimzadeh, K. Raeissi, S. Rtimi, J. Kiwi, S. Giannakis, C. Pulgarin, Insights into the photocatalytic bacterial inactivation by flower-like Bi₂WO₆ under solar or visible light, through in situ monitoring and determination of reactive oxygen species (ROS), *Water*, 12, 2020. doi:10.3390/W12041099.
- [57] V. Palmieri, F. Bugli, M.C. Lauriola, M. Cacaci, R. Torelli, G. Ciasca, C. Conti, M. Sanguinetti, M. Papi, M. De Spirito, Bacteria meet graphene: modulation of graphene oxide nanosheet interaction with human pathogens for effective antimicrobial therapy, *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 3, 619–627, 2017. doi.org/10.1021/acsbiomaterials.6b00812
- [58] T. Pulingam, K.L. Thong, M.E. Ali, J.N. Appaturi, I.J. Dinshaw, Z.Y. Ong, B.F. Leo, Graphene oxide exhibits differential mechanistic action towards Gram-positive and Gram-negative bacteria, *Colloids Surfaces B Biointerfaces.*, 181, 6–15, 2019. doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.05.023
- [59] P. Chen, X. Guo, S. Li, F. Li, A review of the bioelectrochemical system as an emerging versatile technology for reduction of antibiotic resistance genes, *Environ. Int.*, 156, 106689, 2021. doi.org/10.1016/j.envint.2021.106689





Investigation of load-displacement behavior of cement-coated geotextile reinforced sandy soils

Çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş kumlu zeminlerin yük deplasman davranışının incelenmesi

Mitat Öztürk^{1,*} , Cafer Kayadelen² , Gökhan Altay³ , Yakup Önal⁴ 

^{1,2,3,4} *Osmaniye Korkut Ata University, Civil Engineering Department, 80010, Osmaniye, Türkiye*

Abstract

In this study, typical California Bearing Ratio (CBR) experiments were conducted to examine the behavior of cement-coated geotextile reinforced soils. For this purpose, firstly geotextile-reinforced then cement-coated geotextile-reinforced tests were carried out for sand soil and base material. The results of the experiments reinforced soils with geotextile were compared with the results obtained from the tests of reinforced soils with cement-coated geotextile. In addition, the test results of the unreinforced soil were compared with the reinforced conditions. The results of the experiments were evaluated in terms of load-displacement behavior and CBR values. In view of this results, base material reinforced with cement-coated geotextile outperformed compared to the unreinforced case; however, geotextile reinforced base material demonstrated worse than the unreinforced case, up to 6 mm displacement. On the other hand, both the geotextile reinforced, and cement-coated geotextile reinforced cases outperformed the unreinforced case on sand soil. In addition, cement-coated geotextile reinforced cases demonstrated better performance compared to the geotextile cases on both sand soil and base material. In terms of CBR values, geotextile and cement-coated geotextile reinforced sand soil indicated improvements of 1.68 and 3.25 times, respectively. While the CBR value of the cement-coated geotextile reinforced base material increased by 59%, it decreased by 4% in the geotextile reinforced case.

Keywords: Geotextile, Cement-coated geotextile, CBR experiment, Load-displacement behavior, CBR value

1 Introduction

In practice, there may be applications where it is necessary to increase the bearing capacity of the soil. For this purpose, soil can be reinforced with additives [1,2], fibers [3–5], and geosynthetics [6–8]. Geosynthetics are widely used not only to increase bearing capacity, but also in many fields in geotechnical engineering [9–11]. Therefore, geosynthetics are of significant importance for geotechnical engineering.

Özet

Bu çalışmada, çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş zeminlerin davranışını incelemek için tipik Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla kum zemin ve temel malzemesi için önce geotekstil daha sonra çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş deneyler yapılmıştır. Geotekstil ile güçlendirilmiş zeminler ile yapılan deneylerin sonuçları çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş zeminlerin deneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca güçlendirilmemiş durumdaki zeminin deney sonuçları güçlendirilmenin yapıldığı durumlar ile de kıyaslanmıştır. Deney sonuçları yük-deplasman davranışı ve CBR değerleri açısından değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre, çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş temel malzemesi, güçlendirilmemiş duruma göre daha iyi performans göstermiştir; ancak geotekstil ile güçlendirilmiş temel malzemesi 6 mm yer değiştirmeye kadar güçlendirilmemiş durumdan daha kötü performans göstermiştir. Öte yandan hem geotekstil hem de çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş durumlar, kum zeminde donatısız duruma göre daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş durumlar hem kum zeminde hem de temel malzemesinde geotekstil ile güçlendirilmiş durumlara göre daha iyi performans göstermiştir. CBR değerleri açısından, geotekstil ve çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş kum zemin sırasıyla 1,68 ve 3,25 kat iyileşme göstermektedir. Çimento kaplı geotekstil ile güçlendirilmiş temel malzemesinin CBR değeri %59 artarken, geotekstil ile güçlendirilmiş durumda %4 azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Geotekstil, Çimento kaplı geotekstil, CBR deneyi, Yük-deplasman davranışı, CBR değeri

The highway layer consists of pavement, base, subbase, and subgrade layers. The traffic loads acting on the pavement layer are transmitted to the lower layers under the pavement. Traffic loads cause rutting in the pavement and the soil layers under the pavement. Thus, the deformation of the highways affects comfort considerably. In order to get rid of the effects of this adverse situation, the weak subgrade can be changed, the thickness of the base layer can be increased, or the soil layer can be strengthened. Increasing the layer thickness and replacing the weak soil is not always appropriate and

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mitatozturk@osmaniye.edu.tr (M. Öztürk)
Geliş / Received: 08.08.2023 Kabul / Accepted: 24.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1286185

applicable. For this reason, reinforcement with geosynthetics is widely used in highways [12,13].

California Bearing Ratio (CBR) value of soils is crucial for the design of flexible pavements and highways [14]. CBR parameter provides information about the strength of the subbase and subgrade soil [15]. For instance, the thickness of the subbase or subgrade pavement of airways, railroads, and highways is indirectly estimated using the CBR value [16]. Therefore, determining the CBR value is crucial for geotechnical structures [17,18]. In addition, while it is beneficial to have information about the CBR value, there are many studies in the literature to estimate the CBR value [18–21].

It is essential to determine the CBR value for design procedure of geotechnical structures. Besides, improving the CBR values of soils is even more essential. For this purpose, many studies were carried out by adding Palm tree pruning waste [12], fly ash [22], fibers [23], cement [24], lime [25], rubber waste [26], and geotextile [27] to the soils. Önal et al. [12] have conducted CBR experiments to investigate the impact of palm tree pruning waste and geotextile usage on the load-displacement behavior of the subgrade soil. They located the palm tree pruning waste and geotextile at H/4 and H/8 from the surface of the CBR mold. As a result of the tests, it was observed that palm tree pruning waste reinforced cases outperformed geotextile reinforced cases in terms of CBR value. Bağrıaçık [25] carried out CBR experiments by mixing 3%, 4%, 5%, and 6% lime by volume on soil with a low CBR value. As a result of the experiment, it was understood that reinforcing the soil with lime increased the performance in load-deformation behavior and CBR value. The optimum lime ratio was determined as 5% by volume. Öztürk et al. [28] carried out CBR experiments on sand soil and mine wastes (olivine and serpentine) at 30% and 80% relative density. They stated that sand soil demonstrated better behavior than serpentine and olivine at 30% and 80% relative density. Negi and Singh [27] have carried out CBR experiments to examine the CBR value of geotextile reinforced soils (sandy and clayey soil). They placed non-woven and woven geotextiles in different combinations. They stated that woven geotextile reinforcement outperformed non-woven geotextile reinforcement.

In this study, the load displacement behaviors of the unreinforced, geotextile reinforced, and cement-coated geotextile reinforced cases were investigated via the CBR test on both sand soil and base material. The obtained results were compared in terms of load displacement behavior and CBR values.

In this study, the load displacement behaviors of the unreinforced, geotextile reinforced, and cement-coated geotextile reinforced cases were investigated via the CBR test on both sand soil and base material. The obtained results were compared in terms of load displacement behavior and CBR values.

2 Material and methods

2.1 Sand subgrade and base soil

In unpaved roads, the highway base material consists of granular soil with a high CBR value, and the subgrade layer

consists of soils with a low CBR value. Therefore, two different soils (i.e., sand soil and base material) were used in the experiments. The properties of sand soil which were determined before [29] and base material are presented in Tables 1 and 2, respectively. According to ASTM D2487 [30], while the sand soil was classified as poorly graded sand (SP), the base material was classified as well-graded gravel (GW). The particle distributions of base material and sand soil were obtained according to ASTM D6913 [31] and are given in Figure 1. Also, in the same figure, the upper and lower limits of base material were given. As the CBR value of the subgrade soil is generally low on unpaved roads, sand soil with a relative density of 70% was used in the experiments. Experiments with the base material were carried out at optimum water content.

Table 1. Properties of the base material

Properties	Value
Los Angeles abrasion (%)	22.80
MgSO ₄ loss (%)	2.71
Water absorption (%)	0.40
Methylene blue (%)	0.50
Coefficient of curvature, C _c	1.50
Coefficient of uniformity, C _u	18.00
D ₁₀ (mm)	0.50
D ₃₀ (mm)	2.60
D ₅₀ (mm)	6.00
D ₆₀ (mm)	9.00
w _{opt} (%)	4.94
Maximum dry density (kN/m ³)	2.33

Table 2. Properties of the sand soil [29]

Properties	Value
Specific gravity	2.74
D ₁₀ (mm)	0.38
D ₃₀ (mm)	0.50
D ₆₀ (mm)	0.70
Coefficient of uniformity, C _u	1.84
Coefficient of curvature, C _c	0.94
Minimum dry density (kN/m ³)	14.12
Maximum dry density (kN/m ³)	16.97
Maximum void ratio, e _{max}	0.79
Minimum void ratio, e _{min}	0.62
Relative density (%)	70

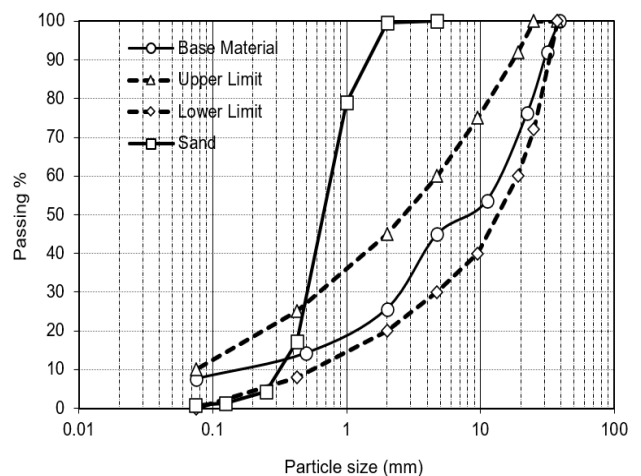


Figure 1. Particle size distribution of sand soil and base material

2.2 Geotextile and cement-coated geotextile

In the study, a geotextile made of polypropylene material with a density of 400 g/m² and a thickness of 2.5 mm was used. The properties of the geotextile used in the experiments are presented in Table 3.

Table 3. Properties of geotextile

Properties	Units	Value
Material Composition	-	Polypropylene (PP), white
Material Density	g/m ²	400
Thickness	mm	2.5
Tensile Strength, md/cmd*	kN/m	21 / 23
Elongation at Break	%	50
UV Resistance	%	70
Dynamic Puncture Strength	mm	8
Static Puncture Strength	N	4000
Apparent Opening	mm	0.11
Liquid Permeability	m/s	0.04

* cmd = cross-machine direction, md = machine direction

Cement-coated geotextile was produced by using the same geotextile that was introduced in Table 3. Cement paste was prepared at a water/cement ratio of 0.5 according to TS EN 196-1 [32] standard. CEM I 42.5 R Portland cement was used to prepare of cement paste. Cement-coated geotextile is obtained by applying cement paste on both sides of the geotextile. When the process was completed, 0.5 grams of cement paste were applied to each surface of the geotextile per cm². The obtained cement-coated geotextile was used in the experiments after being kept in the standard curing pool for 28 days. The thickness of the cemented geotextile was measured in many places of cement-coated geotextile, and the average thickness was determined as 5.5 mm. A photograph of the geotextile and cement-coated geotextile used in the experiments is given in Figure 2.

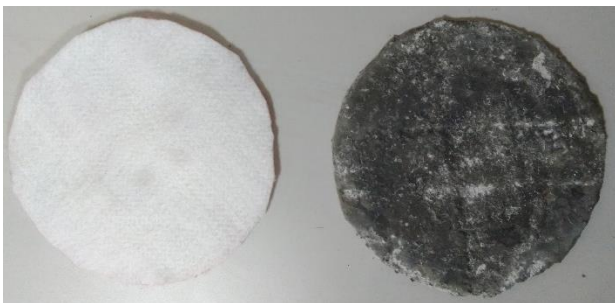


Figure 2. The photograph of geotextile and cement-coated geotextile

2.3 Experimental program

Experiments were performed according to ASTM D4429-09a [33] and ASTM D1883 [34]. In the experiments, force values were obtained in relation to deformations. The

program of the experiments carried out within the scope of the study is given in Table 4. Standard CBR mold was used in the experiments. The diameter and height of the standard CBR mold are 152.4 and 116.4 mm, respectively. H refers to the height of the standard CBR mold. The burial depth of the reinforcement elements was chosen as H/8 for sand soil and H/5 for granular soil. The H/8 burial depth of the reinforcement element is compatible with the literature [12]. The reason for choosing H/5 for the granular soil is that the maximum particle size of the granular soil is 19 mm. A schematic sketch of the experiments and a photograph of the experimental setup are presented in Figure 3 and Figure 4, respectively.

Table 4. Program of the experiments

No	Reinforcement Type	Soil Type	Burial Depth (u) (mm)
1	Unreinforced	Sand Soil	-
2	Geotextile reinforced	Sand Soil	H/8
3	Cement-coated geotextile reinforced	Sand Soil	H/8
4	Unreinforced	Base material	-
5	Geotextile reinforced	Base material	H/5
6	Cement-coated geotextile reinforced	Base material	H/5

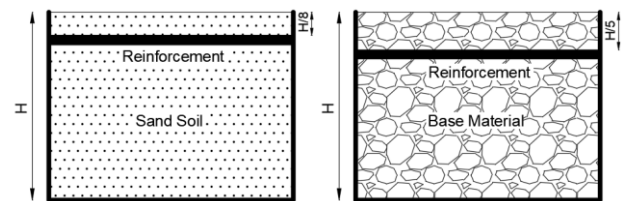


Figure 3. Schematic sketch of the experiments a) sand soil b) base material



Figure 4. Experimental setup

3 Results and discussions

The load displacement curves of the unreinforced, geotextile reinforced, and cement-coated geotextile reinforced on the sand soil are given in Figure 5. In unreinforced and geotextile reinforced cases, the load becomes constant after a certain peak value. However, in the case of reinforced with cement-coated geotextile, it can be understood that the load is constantly increasing, does not reach a certain peak value, and does not remain constant at a certain load value. Figure 5 illustrates that after 3 mm of deformation, both geotextile and cement-coated geotextile reinforced cases demonstrated greater strength than unreinforced cases. Additionally, cement-coated geotextile reinforcement cases performed better than geotextile reinforcement.

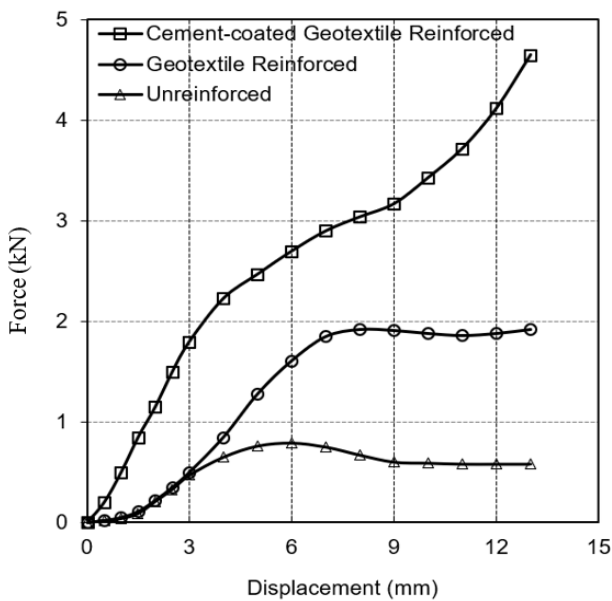


Figure 5. Force-displacement curves for sand soil

The load displacement curves of the unreinforced, geotextile reinforced, and cement-coated geotextile reinforced on the base material are given in Figure 6. In all experiments, the load value increased with increasing deformation. After 2 mm of deformation in all curves, the curves continued with a constant slope. The behavior of the geotextile-reinforced subgrade is worse compared with the unreinforced case while the behavior of the cement-coated geotextile reinforced case is better than the behavior of the unreinforced case.

Photographs of cement-coated geotextiles after the tests on sand soil and base material are shown in Figure 7. After the test on the sand soil, it can be understood from the figure that the center of the cement-coated geotextile is deformed. Nevertheless, it can be observed that the cement-coated geotextile did not occur any damage after the test on the base material.

The improvement factor in the bearing capacity (I_f) proposed by Dash et al. [35] is used to represent performance improvement owing to reinforcement in the bearing capacity. The ratio of the load carried with reinforced case to

the load carried by the unreinforced case at the same deformation is known as the bearing capacity improvement factor, and a greater value of I_f indicates a better increase in the bearing capacity. Table 5 demonstrates the improvement factor in the bearing capacity of reinforced cases on the sand soil. The improvement factor in the bearing capacity of the base material is given in Table 6.

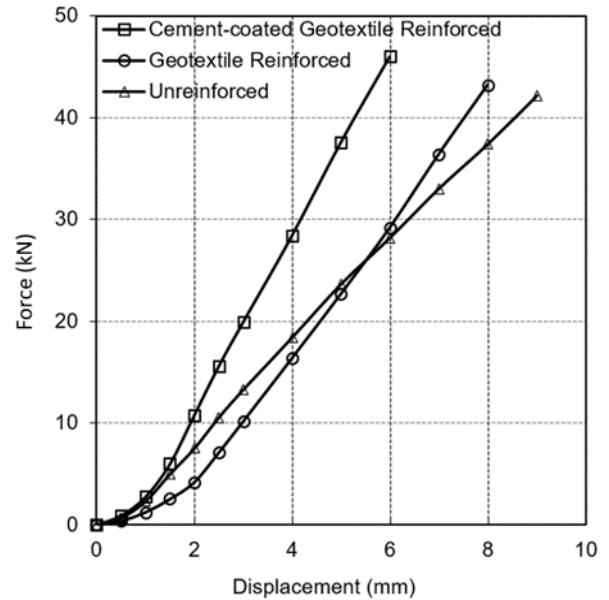


Figure 6. Force-displacement curves for base material



Figure 7. The photographs of cement-coated geotextiles after the experiments a) sand soil b) base material

CBR values determined according to ASTM D1883 [34] are presented in Table 7. The CBR values for unreinforced, geotextile reinforced, and cement-coated geotextile reinforced sand soil cases were 3.93%, 6.62%, and 12.77%, respectively. CBR values increased in both cases with reinforcement. However, as a result of the experiments on the base material, the CBR value increased in the case of reinforced with cement-coated geotextile while the CBR value decreased in the case of reinforced with geotextile. The CBR values obtained for unreinforced, geotextile reinforced, and cement-coated reinforced cases in the base material were 122.22%, 117.31%, and 194.32%, respectively. The decrease in CBR value in the case of reinforcement with geotextile may be due to the already strength sufficient base material.

Table 5. Improvement factor in the bearing capacity for sand soil

Reinforcement Type	Burial Depth (u)	Improvement factor in the bearing capacity (I_f)										
Geotextile	H/8	1.00	1.22	1.06	1.06	1.31	1.68	2.04	2.47	2.87	3.18	3.21
Cement-coated Geotextile	H/8	10.0	9.44	4.55	3.83	3.43	3.25	3.42	3.87	4.54	5.28	6.41
Deformation (mm)		0.5	1.5	2.5	3	4	5	6	7	9	11	13

Table 6. Improvement factor in the bearing capacity for base material

Reinforcement Type	Burial Depth (u)	Improvement factor in the bearing capacity (I_f)										
Geotextile	H/5	0.56	0.54	0.51	0.56	0.67	0.77	0.83	0.89	0.93	0.96	1.04
Cement-coated Geotextile	H/5	1.30	1.19	1.20	1.43	1.48	1.50	1.52	1.54	1.57	1.59	1.63
Deformation (mm)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0

Table 7. CBR values of reinforced and unreinforced soils

Reinforcement Type	Soil Type	Burial Depth (u)	CBR Value (%)
Unreinforced	Sand	-	3.93
Geotextile	Sand	H/8	6.62
Cement-coated Geotextile	Sand	H/8	12.77
Unreinforced	Granular	-	122.22
Geotextile	Granular	H/5	117.31
Cement-coated Geotextile	Granular	H/5	194.32

4 Conclusions

This study included conventional California Bearing Ratio (CBR) experiments to examine the behavior of geotextile, and cement-coated geotextile reinforced soils. For this reason, experiments were carried out on sand soil and base material using geotextile and cement-coated geotextile reinforcement. The outcomes of the reinforced tests were compared with those of the unreinforced tests as well as with each other. The load-displacement behavior and CBR values were used to assess the experiment's outcomes. From the results of the experimental study can be deduced from the following conclusions:

- Compared to the unreinforced case, base material reinforced with cement-coated geotextile performed better; nevertheless, geotextile reinforced base material performed worse, up to 6 mm displacement.
- On sand soil, the geotextile and cement-coated geotextile reinforced cases both demonstrated better performance compared to the unreinforced case.
- On both sand soil and base material, cement-coated geotextile reinforced cases outperformed geotextile reinforced cases regarding load-displacement behavior.
- Geotextile and cement-coated geotextile reinforced sand soil cases showed improvements in CBR values of 1.68 and 3.25 times, respectively.
- The CBR value of the geotextile reinforced base material case decreased by 4%, while it increased by 59% for the cement-coated geotextile reinforced base material.

Acknowledgement

This paper was produced from the Ph.D. thesis study of the first author within the Osmaniye Korkut Ata University, Institute of Science and Technology. The authors thank to Geoplas company for the supply of geotextile. This study was partly supported by Osmaniye Korkut Ata University Scientific Research Projects Unit (Project No: OKÜBAP-2022-PT2-041).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 16%

References

- [1] B. Bagriacik, Utilization of alkali-activated construction demolition waste for sandy soil improvement with large-scale laboratory experiments. *Construction and Building Materials*, 302 124173, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124173>.
- [2] M. Sandiani and J. Tanzadeh, Laboratory assessing of the liquefaction potential and strength properties of Sand soil treated with mixture of nanoclay and glass fiber under dynamic and static loading. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 12661–12684, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.08.059>.
- [3] N. C. Consoli, M. A. Vendruscolo, and P. D. M. Prietto, Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 96–101, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2003\)129:1\(96\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2003)129:1(96)).
- [4] T. Yetimoglu, M. Inanir, and O. E. Inanir, A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 23 174–183, 2005. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTEXMEM.2004.09.004>.
- [5] P. M. Chaple and A. I. Dhattrak, Performance of coir fiber reinforced clayey soil. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 2–4, 2013.
- [6] G. M. Latha and A. Somwanshi, Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand.

- Geotextiles and Geomembranes, 27 281–294, 2009. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTEXMEM.2009.02.001>
- [7] S. Saha Roy and K. Deb, Bearing capacity of rectangular footings on multilayer geosynthetic-reinforced granular fill over soft soil. *International Journal of Geomechanics*, 17 04017069, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.19435622.0000959](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.19435622.0000959).
- [8] N. Ceylan Bora, C. Kayadelen, G. Altay, Y. Önal, M. Öztürk, P. Cafer Kayadelen, and M. Yakup Önal, Comparative effectiveness research of palm tree pruning waste and geotextiles on subgrade stabilization. *Grağevinar*, 74 829–839, 2022. <https://doi.org/10.14256/JCE.3401.2021>.
- [9] Y. Önal, M. Çalışıcı, C. Kayadelen, and G. Altay, A comparative experimental study of geocell and geogrid-reinforced highway base layers under repeated loads. *Road Materials and Pavement Design*, 1–16, 2023. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2182126>.
- [10] G. Altay, C. Kayadelen, T. Taşkıran, and Y. Z. Kaya, A laboratory study on pull-out resistance of geogrid in clay soil. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 139 301–307, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.065>.
- [11] C. Kayadelen, T. Ö. Önal, and G. Altay, Experimental study on pull-out response of geogrid embedded in sand. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 117 390–396, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.024>.
- [12] Y. Önal, M. Öztürk, G. Altay, and C. Kayadelen, Comparison of the effect of geotextile and palm tree pruning waste on cbr value of sand soil. *Osmaniye Korkut Ata University Journal of the Institute of Science and Technology*, 5 570–579, 2022. <https://doi.org/10.47495/OKUFBED.998633>.
- [13] E. Kaplan, C. Kayadelen, M. Öztürk, Y. Önal, and G. Altay, Experimental evaluation of the usability of palm tree pruning waste (PTPW) as an alternative to geotextile. *Revista de la Construcción*, 21 69–82, 2022. <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.1.69>.
- [14] D. K. Talukdar, A Study of correlation between california bearing ratio (cbr) value with other properties of soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 562, 2014.
- [15] L. S. Ho and V. Q. Tran, Machine learning approach for predicting and evaluating California bearing ratio of stabilized soil containing industrial waste. *Journal of Cleaner Production*, 370 133587, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133587>.
- [16] T. Taskiran, Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Advances in Engineering Software*, 41 886–892, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.01.003>.
- [17] B. Yildirim and O. Gunaydin, Estimation of California bearing ratio by using soft computing systems. *Expert Systems with Applications*, 38 6381–6391, 2011. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2010.12.054>.
- [18] A. Bardhan, C. Gokceoglu, A. Burman, P. Samui, and P. G. Asteris, Efficient computational techniques for predicting the California bearing ratio of soil in soaked conditions. *Engineering Geology*, 291 106239, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106239>.
- [19] I. González Farias, W. Araujo, and G. Ruiz, Prediction of California Bearing Ratio from index properties of soils using parametric and non-parametric models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36 3485–3498, 2018. <https://doi.org/10.1007/S10706-018-0548-1/FIGURES/10>.
- [20] M. Alawi, M. Rajab, M. H. Alawi, and M. I. Rajab, Prediction of California bearing ratio of subbase layer using multiple linear regression models. *Road Materials and Pavement Design*, 14 211–219, 2013. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.757557>.
- [21] T. V. Nagaraju, C. D. Prasad, and M. J. Raju, Prediction of California Bearing Ratio using particle swarm optimization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1048 795–803, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0035_0_65/COVER.
- [22] K. Ontürk, S. Firat, I. Vural, J. M. Khatib, S. Üniversitesi, G. Meslek, Y. Mimari, R. Bölümü, G. Üniversitesi, T. Fakültesi, and İ. M. Bölümü, Uçucu kül ve mermer tozu kullanarak yol altyapısının iyileştirilmesi. *Journal of Polytechnic*, 17 35–42, 2014. <https://doi.org/10.2339/2014.17>.
- [23] B. Kalantari, B. B. K. Huat, and A. Prasad, Effect of polypropylene fibers on the California Bearing Ratio of air cured stabilized tropical peat soil. *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 3 1–6, 2010.
- [24] A. P. Balkis and S. Macid, Effect of cement amount on cbr values of different soil. *European Journal of Science and Technology*, 809–815, 2019. <https://doi.org/10.31590/ejosat.588990>.
- [25] B. Bağrıaçık, Ulaşım yapıları temel/alt temel zeminlerinin kireçle stabilizasyonu soil stabilization with lime at transportation structure 's base/subbase abstract. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 32 39–48, 2017.
- [26] E. Merve, O. Kahraman, E. A. Batuhan, Y. Türedi, and M. Örnek, Lastik atık katkılı zeminlerde cbr değerinin araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata University Journal of the Institute of Science and Technology*, 2 41–44, 2019.
- [27] M. S. Negi and S. K. Singh, Experimental and numerical studies on geotextile reinforced subgrade soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 00 1–12, 2019. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1684654>.
- [28] M. Öztürk, Y. Önal, B. Ok, G. Altay, A. Beycioğlu, and A. Keskin, Load-displacement behavior of serpentine and olivine obtained as waste from the mines. *International Conference on Engineering, Natural and Applied Science 2021 (ICENAS'21) (2021)*, pp. 166–1732021.
- [29] G. Altay, Geocell kullanılarak oluşturulan dayanma duvarlarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Osmaniye2019*.

- [30] ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA,2006.
- [31] ASTM D6913, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA,2006.
- [32] TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü,2016.
- [33] ASTM D4429, Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of soils in place (withdrawn 2018). ASTM International, West Conshohocken, PA,2009.
- [34] ASTM D1883, Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, West Conshohocken, PA,2016.
- [35] S. K. Dash, N. R. Krishnaswamy, and K. Rajagopal, Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand. Geotextiles and Geomembranes, 19 235–256, 2001.[https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00006-1).





Türkiye’de üretilen geleneksel gıdalardan pastırma ve sucukların fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve serolojik özelliklerinin belirlenmesi

Determination of physicochemical, microbiological, and serological properties of pastırma and sucuk from traditional foods produced in Turkey

Nuran Erdem^{1,*} , Süleyman Gökmen² 

¹ Aksaray Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, 68500, Aksaray Türkiye

² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 70100, Karaman, Türkiye

Öz

Et işleme ve ürüne dönüştürme süreçleri zahmetli ve maliyetlidir. Bu nedenle daha fazla kâr elde etme amacıyla bazı işletmeler tarafından et ürünleri içerisine daha ucuz ikame maddeleri ilave edilmekte, çeşitli taklit ve tağşişler yapılmaktadır. Etkili bir gıda kontrolü ve güvenilir gıda üretiminin sağlanmasında temel bileşenler mevzuat ve resmi kontrollerdir. Araştırma, Türkiye’de yapılan resmi denetimler esnasında alınan sucuk ve pastırma örneklerinin bazı kalite özelliklerinin ve gıda güvenliğine uygunluğunun belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Türkiye’de üretilen pastırma ve sucuklardan 8 yıl süresince örnekler alınarak kalite analizleri yapılmıştır. Kalite parametreleri olumsuz sonuçlanan sucuk örneği sayısının 574 (%6.69) olduğu, olumsuz sonuçlanan örnek sayısının 71 (%12.37) ile 2017’de en yüksek, 39 (%6.79) ile 2015’de en düşük olduğu belirlenmiştir. Bu olumsuzlukların temelini; sucuk örneklerindeki yağ miktarının yüksek olması, histolojik muayenede tek tırnaklı, kanatlı ve domuz etlerinin saptanması oluşturmuştur. Pastırma örneklerinde ise olumsuz kalite parametrelerine rastlanan örnek sayısı 49 (%3.25) olup, olumsuz örnek sayısının 2018’de (7 adet/%8.54) en yüksek, 2014’de en düşük (1 adet/%2.04) olduğu belirlenmiştir. Bu olumsuzlukların temelini ise, pastırmalardaki rutubetin ve koagülaz (+) *Staphylococcus* yükünün yüksek olması oluşturmuştur. Bu sonuçlara göre pastırma ve sucuklarda dikkat edilmesi gereken parametrelerin başında histolojik muayene, rutubet, yağ ve mikrobiyolojik kriterlerin bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sucuk, Pastırma, Kalite, Gıda güvenliği, Geleneksel et ürünleri

Giriş

Hayvansal kaynaklı gıdalar, protein değerlerinin yüksek olması nedeniyle beslenmede önemli bir yere sahiptir. Yeterli ve dengeli beslenme amacıyla alınan protein miktarının en az %50’sinin hayvansal kaynaklı olması gerekmektedir [1]. Et, bileşimindeki yüksek biyolojik değerli protein, demir, B12 vitamini ve diğer B kompleks

Abstract

Meat processing and its processes are laborious and costly. For this reason, some producers reduce the cost by adding cheaper substitutes to meat products, making imitation and adulteration to gain more profit. Legislation and official controls are key components in ensuring effective food control and safely food production. This study was conducted to determine some quality characteristics and compliance with food safety of sausage and pastrami samples collected during official controls in Turkey. For this purpose, pastrami and sausages produced in Turkey for 8 years were taken from food companies and quality analyzes of taken samples were performed. Based on obtained results, it was found that the total number of samples with negative quality parameters in sausage samples was 574 (6.69%). In terms of quality parameters, the highest number of negative samples (71, 12.37%) was identified in 2017 and the lowest number of negative samples (39, 6.79%) in 2015. The main reasons for these problems are high fat content in the sausages and the presence of horse, poultry and pork meats in the histological examination of red meats. In the pastrami samples, the number of samples with negative quality parameters was 49 (3.25%). The number of negative samples was highest in 2018 (7 items/8.54%) and lowest in 2014 (1 item/2.04%) has been determined. The basis of these negativities was the high humidity and coagulase (+) *Staphylococcus* load in pastrami. According to these results, it was concluded that histological examination, moisture, fat and microbiological criteria are the main parameters to be considered in bacon and sausage.

Keywords: Sucuk, Pastırma, Quality, Food safety, Traditional meat products

vitaminleri, çinko, selenyum, fosfor vb. besin elementleriyle, fiziksel ve mental gelişim bakımından önemli gıda maddeleri arasında yer almaktadır [2]. Ülkemizde ve dünyada, damak tadı ve geleneklere göre farklı et ürünleri bulunmaktadır [3]. Jerky Güney Amerika; Country Style Ham ABD; Serrano ve Iberian Ham İspanya; Toscano İtalya; Bayonne Ham Fransa; Spekeskinke Norveç; Hangikjöt İzlanda; Jinhua Ham ise Çin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nuran.erdem42@gmail.com (N. Erdem)

Geliş / Recieved: 21.04.2023 Kabul / Accepted: 17.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1286400

için önem arzeden et ürünleri arasında yer almaktadır [4]. Sucuk ve pastırma, Türkiye'de yaygın olarak tüketilen geleneksel et ürünleri arasında yer almaktadır [5].

Tarihi kayıtlarda, milattan önce 2000'li yıllardan itibaren kurutma, fermentasyon, salamura, tuzlama vb. işlemlerin etin muhafazası amacı ile kullanıldığı belirtilmektedir [6]. Kürleme, fermente edilerek kurutulan et ürünlerinin raf ömrünü uzatmak amacı ile kullanılmakta olan bir yöntemdir. Nitrat, nitrit vb. katkı maddeleri, arzu edilen renk, aroma oluşumu ve bozunma yapan mikroorganizmaların inhibe edilmesini sağlamaktadır. Kürleme ajanlarının avantajlarına rağmen, limit değerlerin üzerinde kullanımı sağlık risklerine de beraberinde getirmektedir [5]. Et ürünlerinin incelenmesi amacıyla anatomik, histolojik, mikroskopik, organoleptik, kimyasal, elektroforetik, kromatografik veya immünojenik yöntemlere dayanan çeşitli analitik yöntemler uygulanmaktadır [7].

Kimyasal analiz yöntemleri ile kaliteyi düşüren ve besleyici değeri azaltan bitkisel kaynaklı maddelerin karıştırılma oranları; mikrobiyolojik analiz yöntemleri ile çiftlikten sofraya tüm proseslerde hijyenik koşullara uyulup uyulmadığı belirlenmektedir. Serolojik yöntemlerle eti kullanılan hayvan türleri; organoleptik analizlerle ise genel görünüm, renk, aroma, lezzet gibi subjektif parametreler tespit edilmektedir [8, 9]. Et ve et ürünlerine histolojik analizler de uygulanmaktadır. Histolojik analizlerle prolin ve hidroksi prolin ölçümleri yapılarak kollajen miktarı ve et ürünlerine katılan doku tipleri tespit edilmektedir [10, 11]. Tüm bu analizler gıda güvenliğinin sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Standartlar, denetim şekli ve sonucunu büyük ölçüde etkileyebilmektedir. Denetim sürecindeki faktörlerden olan denetçinin yeterlilik derecesi de önem arz etmektedir [12]. 2015-2030 yılları için Dünya Gıda Programı topluluğu tarafından, bireylerin hayatlarının iyileştirilebilmesi için küresel çapta amaçlar belirlenmiştir. Bu amaçların temelinde açlığa son verilmesi, güvenilir gıdanın sağlanması, beslenmenin iyileştirilmesi ve sürdürülebilir tarımın teşvik edilmesi yemini, programın öncelikleri arasında yer almaktadır. Ayrıca desteklenme gereksinimi bulunan ülkelerin sosyal ve ekonomik kalkınması için gıda yardımı yapılması, acil durumlar ve kriz dönemlerinde ortaya çıkan gıda ihtiyacının giderilmesi, BM ve FAO'nun önerileri doğrultusunda küresel çapta gıda güvenliğinin sağlanabilmesi amacıyla, 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri kapsamında yardım faaliyetleri yürütülmekte ve sürdürülmektedir [13].

Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından denetim faaliyetleri; risk bazlı denetim prosedürüne uygun olarak, gıdaların içeriklerine göre yıl içerisinde bir veya daha fazla sıklıkta gerçekleştirilmektedir. Gıda üretim yerleri ve özellikle hayvansal kaynaklı gıdalar için, sağlık yönüyle oluşturduğu riskler nedeniyle denetim sıklığı daha fazla gerçekleştirilirken, satış ve toplu tüketim yerleri için daha az sıklıkta gerçekleştirilmektedir [14].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Gıda Tarım Örgütü (FAO) ve Codex Alimentarius Uzmanlar Komisyonu tarafından gıda güvenliği, "sağlıklı ve kusursuz gıda üretiminin sağlanması amacıyla gıdaların üretim, işleme, muhafaza,

taşıma ve dağıtım aşamalarında gerekli kurallara uyulması ve önlemlerin alınması" şeklinde tanımlanmıştır [15]. Son yıllarda tüketicilerin bilinçlenmesine paralel olarak, gıda kanunlarının ülkeler tarafından daha sağlıklı ve güvenilir gıda üretilmesi amacıyla güncellenmesi sonucu önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Üretim zincirinin herhangi bir halkasındaki aksama, tüketime sunulan gıdaların güvenliğinde çeşitli risklerin ortaya çıkmasına yol açabilmektedir [16]. Etkili bir gıda kontrolü ve güvenilir gıda üretiminin sağlanmasında temel bileşenler mevzuat ve resmi kontrollerdir [17]. Avrupa Birliği'ne üye devletlerin, resmi gıda kontrollerinin düzenli, risk bazlı ve uygun aralıklarla yapılması amacıyla yasal bir zorunluluğu bulunmaktadır [18]. Yaptırımlar konusunda düzenlemelerin ayrıntıları ve kurumsal çerçevelerle ilgili ülkeler arasında farklılıklar görülmektedir. Ancak gıda üreticileri ile gıda güvenliği mevzuatına uyumun sağlanmasının amaçlandığı ilkeler evrenseldir [19]. Tüm bunlardan dolayı gıda güvenliğinin sağlanması özellikle geleneksel et ve et ürünlerinden pastırma ve sucuk örneklerinde oldukça önemlidir. Bu nedenle bu araştırma, Türkiye'de resmi denetimler esnasında alınan sucuk ve pastırma numunelerinin analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve gıda güvenliğine uygunluğunun belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Materyal ve metot

Materyal

Araştırma, 2011 yılından itibaren 2019 yılı Temmuz ayına kadar yapılan denetim sonuçlarını kapsamaktadır. Çalışmada, Türkiye'de üretim yapan 85 farklı gıda işletmesinden 8 yıl süresince Gıda Mevzuatına ve Gıdalarda Numune Alma Yönetmeliğine uygun olarak sucuk ve pastırma örnekleri alınmış ve bu örneklerin bazı kalite analizleri yapılmıştır [20].

2.2 Metot

2.2.1 Fizikokimyasal analizler

Rutubet tayini, tuz tayini, pH, benzoik asit, sorbik asit tayinleri, boya aranması, nişasta aranması, nitrit ve nitrat tayini, antibiyotik aranması, dioksin ve dioksin benzeri poliklorlu bifeniller (PCB) toplamı, ağır metal tayini TS 1069 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [21].

Rutubet tayini: Gravimetrik olarak belirlenmiştir.

Tuz tayini: Üründe serbest klor içeriğinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır.

pH tayini: El tipi pH metre (AZ Instrument) ile numuneye, cam elektrot ile referans elektrot arasındaki gerilim farkının ölçülmesi esasına göre yapılmıştır.

Benzoik asit tayini: Tayin spektrofotometrik olarak yapılmıştır. Benzoik asit içeren seri kalibrasyon standart solüsyonları hazırlanmıştır. Örneklerin ve standartların optik yoğunlukları 267.5, 272 ve 276.5 nm de okunmuştur. Daha sonra absorbanlar bulunarak değerler hesaplanmıştır.

Sorbik asit tayini: Sorbik asidin örneklerden izolasyonu ile buharlı distilasyon ile örneklerden ekstrakte edilen sorbik asidin potasyum dikromat ile oksidasyonu ve oluşan malonaldehitin tiyobarbitirik asit (TBA) ile titrasyonu yani renk değişimi (kırmızı rengin oluşması) prensibine dayanılarak gerçekleştirilmiştir.

Organik boya aranması: Gliserin ve salisilat çözeltisi kullanılarak homojen hale getirilen örneğin içerisine katılmış ve su banyosunda ısıtılıp süzümüştür. Süzüntünün rengine bakılarak renk sarı (-), renk kırmızı ise şap çözeltisi içerisinde 1-2 saat dinlendirilmiştir. Çökelek oluşuyorsa (+) oluşmuyorsa (-) olarak değerlendirilmiştir.

İnorganik boya aranması: Potasyum bisüfit, asetik asit ve yağı önceden giderilmiş yün parçasından yararlanılmıştır. Organik boya aranmasında geriye kalan süzüntünün üzerine sırasıyla potasyum bisüfit, asetik asit ve yün parçası ilave edilip sıcak su banyosunda karışım ısıtılmıştır. Yün parçası kırmızıya boyanıp rengi çıkmazsa inorganik boya (+), değilse (-) olarak değerlendirilmiştir.

Nişasta aranması: Örneğin alkollü KOH ile hidrolizasyonu yapılarak, oluşan üst tabakanın ayrılması sağlanmıştır. Aynı şekilde kabın altında oluşan çökelti etil alkolle yıkanmış ve süzümüştür. Daha sonra Whatman No 1 süzgeç kağıdı ile süzümüştür. Süzgeç kağıdının üzerindeki kalıntının çözülerek hidrolize edilmesi ile oluşan glikozun titrasyonu sonucu tayin edilmiştir.

2.2.2. Mikrobiyolojik analizler

Pastırma ve sucuk örneklerinde koagülaz (+) *Staphylococcus*, sülfiti indirgeyen anaerob bakteri, küf-maya miktarı, *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *E. coli* O157, *Bacillus cereus*, enterotoksin tayini, *Clostridium perfringens*, *Campylobacter* ssp. sayımları TS 1069 standartına uygun olarak yapılmıştır [21].

Koagülaz (+) *Staphylococcus* testi: Bu amaçla Baird Parker Agar kullanılmıştır. Bu besiyerinin kullanılma nedenleri *S. aureus*'ün potasyum telluriti indirgemesi ve yumurta sarısını hidrolize uğratmasıdır. Et örneklerinin seri dilüsyonları hazırlanmıştır. Ekim yapılmış petripler 35°C 48 saat süre ile inkübasyona tabi tutulmuştur. İnkübasyon sonunda petriplerde dar, pürüzsüz, konveks, yuvarlak ve çevresinde yarı saydam bir zon bulunan ortalama 3 mm çapındaki siyah-gri parlak koloniler sayılmıştır. Bu kolonilerin doğrulanması için hazır ticari kitler kullanılarak koagülaz testi yapılmıştır. Hazır ticari kitlerde tipik koloni direkt teste uygulanarak sonuç alınmıştır.

Sülfiti indirgeyen anaerob bakteri sayımı: Sulfite polimiyxin sulfadiazine agar ile analiz gerçekleştirilmiştir. Rolltüp tekniği ile inoküle edilen et örnekleri 35°C 24-48 saat süre ile inkübasyona tabi tutulmuş ve oluşan siyah koloniler sayılmıştır.

Küf ve maya sayımı: %10'luk tartarik asit ile potato dekstroz agar besiyerinin pH değeri 3.5'e ayarlanmıştır. Dökme plak yöntemi ile ekimleri yapılmış ve 25°C'de 5 gün süre ile inkübasyon işlemine tabi tutulmuştur. Oluşan koloniler sayılmıştır.

Salmonella spp. tayini: Ön zenginleştirme yapılan örneklerde seçici zenginleştirme besiyeri olarak Rappaport Vassiliadis (RV) sıvı besiyeri (HiMedia, India) kullanılmıştır. Sıvı besiyeri 42°C'de 24 saat inkübasyona tabi tutulmuştur. Daha sonra seri dilüsyonları hazırlanmıştır. Seçici katı besiyerleri olan salmonella shigella (SS) agar (HiMedia, India) ve brilliant green phenol red lactose sucrose (BPLS) agar'a (HiMedia, India) 25'er mL yayma ekim yapılmıştır. 37°C' de 18-24 saat inkübasyondan sonra

SS agar üzerinde üreyen siyah merkezli koloniler ile BPLS agar üzerinde üreyen laktöz negatif özellikteki pembe şeffaf kolonilerden eğri jeloz besiyerlerine saf kültürler izole edilmiştir. Daha sonra doğrulama testleri (Gram boyama, sitokrom oksidaz ve katalaz) gerçekleştirilmiştir.

Listeria monocytogenes aranması: *Listeria* selective Enrichment Broth Base (LEB, Oxoid CM 862) inkübasyon ile ön zenginleştirme, zenginleştirme (asıl zenginleştirme broth'u olan Fraser Broth'a Oxoid CM 895 ile inkübasyon), katı besiyeri Oxford (*Listeria* Selective Agar Base, Oxoid CM 856) ve Palcam agar'a (Oxoid CM 877) ekim ile kolonilerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Yeşil gri koloniler şüpheli görünerek TSA ekim yapılmış ardından rapid test aşaması gerçekleştirilmiştir.

E. coli O157 aranması: İmmunolojik test kitleri kullanılarak hızlı testler gerçekleştirilmiştir. Selektif zenginleştirme besiyeri kültüründen alınan koloninin su içindeki süspansiyonu, kaynar suda 15 dakika bekletilmiştir. Daha sonra ise oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulmuştur. Ardından oluşan süspansiyondan belli bir miktar kitin gözüne yerleştirilmiş ve 20 dakika süresince oda sıcaklığı koşullarında bekletilmiştir. Süre sonunda kitte kırmızı bir şerit oluşmuşsa test (+) olarak değerlendirilmiştir.

Bacillus cereus aranması: Et numunesi, Trypticase Soy (CASO) Polimiksin Broth besiyerinde 30°C'de aerobik koşullarda 21±3 saat inkübasyona tabi tutulmuştur. Bu süre sonunda bulanıklık oluşuyorsa MYP agara sürme ekim yapıp standart analize devam edilmiş ve var/yok testi yapılmıştır.

Enterotoksin tayini: ELISA tekniğinden yararlanılarak stafilokok izolatlarındaki klasik tip (SEA-SEE) enterotoksin varlıkları tespit edilmiştir.

Clostridium perfringens analizi: Perfringens Enrichment Medium kullanılarak zenginleştirme yapılmış, Tryptose Sulphite Cycloserine (TSC) agar ile ekim yapılmıştır. Doğrulama testlerinden Gram boyama, katalaz, laktöz, jelatin, hareketlilik, nitrat, reverse-CAMP ve asit fosfataz analizleri yapılmıştır. *Clostridium perfringens* Gram (+), katalaz (-), laktöz (+), jelatin (+), hareket (-), nitrat (+), reverse- CAMP (+) ve asit fosfataz testi (+)'dir.

Campylobacter analizi: Ön zenginleştirme (Preston Broth), selektif zenginleştirme (Columbia Agar), izolasyon ve doğrulama (biyokimyasal testler) aşamaları gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Serolojik analizler

Ette histolojik muayene, ette tür tayini, domuz eti/geni aranması, soya geni aranması TS 1069 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [21].

Histolojik muayene: Numune önce formolde 1 gün tespit edilmiştir. Dereceli alkol ve ksilen serilerinden geçirilerek parafin bloklara gömülmüştür. Mikrotom yardımı ile parafin bloklardan kesit alınarak lam üzerine konulmuş ve lamelle kapatılmıştır. Hematoksilin eozin ya da trikrom boya yöntemleri ile bu lameller boyanmış ve daha sonra mikrostopta incelenmiştir.

Domuz eti/geni aranması: Çalışmada SureFood Animal Real-time PCR kitleri (Congen) kullanılmıştır. Real-Time PCR tekniğinden yararlanılarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Soya geni aranması: Bu analiz aynı şekilde PCR tekniği ile Soya Geni Taraması-Kit metodu (Bosphore Soy Species Detection Kitv1)'ndan yararlanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.2.4. Duyusal analizler

Pastırma ve sucuk örneklerinde duyusal parametreler TS 1069'a uygun yapılmıştır [21]. Daha önce ürünlerin kalite özellikleri ile bilgilendirme yapılan 10 panelist ile ürünlerde görünüş, tat, koku, genel beğeni ve tekstür parametrelerine göre değerlendirilerek gerçekleştirilmiştir.

Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, Türkiye genelinde yapılan resmi denetimler sonucunda, 2011 yılında toplam 1347 sucuk, 266 pastırma; 2012 yılında 1501 sucuk, 287 pastırma; 2013 yılında 1279 sucuk, 131 pastırma; 2014 yılında 1005 sucuk, 120 pastırma; 2015 yılında 826 sucuk, 115 pastırma; 2016 yılında 753 sucuk, 70 pastırma; 2017 yılında 696 sucuk, 422 pastırma; 2018 yılında 813 sucuk, 82 pastırma; 2019 yılı Temmuz ayına kadar ise 162 sucuk, 2 pastırma numunesi alınmıştır. Yapılan denetimlerde "Denetim Sebebi"nin; Bakanlık/İl/UKİP Yıllık Numune Alma Planı, Alo 174 Denetimi, Gıda İşletmeleri için Riske Dayalı Denetim (Rutin), İzlenebilirlik Denetimi, Takip Denetimi, İhbar ve Şikâyet Denetimi, Çimer Denetimi ve diğer şekilde olduğu belirtilmiştir.

Yüksek devirli kuter ve kolloid değirmenler gibi teknolojik gelişmelerle birlikte et ve et ürünlerinde yapılan hilelerde de artış gözlenmiştir. Gıda sanayii ve hazır gıda üretimindeki gelişmelere paralel olarak, et ürünlerine bitkisel proteinler karıştırılarak yapılan hileler de yaygınlaşmıştır. Bitkisel ürünlerin karıştırılması; su absorpsiyonu, hacim artışı, homojen görünüm, toplam protein artışı ve sıcaklık stabilitesi sağlamaktadır. Hilelerin tespit edilmesinde çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte, Türkiye laboratuvar şartlarında et ve et ürünleri kalite kontrolü amacıyla kimyasal, mikrobiyolojik, serolojik ve organoleptik analiz yöntemleri kullanılmaktadır [8, 22-29].

Tablo 1 incelendiğinde sucuk ve pastırmalardan toplam 10084 adet örnek alındığı, alınan 8577 adet sucuk örneğinden %93.31'inin olumlu, %6.69'unun olumsuz sonuçlandığı; alınan 1507 pastırma örneğinden ise %96.75'inin olumlu, %3.25'inin olumsuz sonuçlandığı tespit edilmiştir.

Araştırmada serolojik analizler sonucunda tespit edilen analiz değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde; alınan örneklerde yabancı doku (özefagus), iç organ (kemik, kıkırdak, meme, fibröz, kollajen, sindirim sistemi organları, ligament vb.), soya (lektin), domuz eti, tek tırnaklı eti, kanatlı eti, kıl, tüy, deri vb. tespit edildiği görülmektedir.

Tablo 1. Sucuk ve pastırma örneklerinin analizlerine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları

Numune Adı	Toplam	Sonuç		Mikrobiyolojik Analizler		Serolojik Analizler		Fizikokimyasal Analizler		Duyusal Analizler		
		Adet	%	Sonuç	Adet	%	Adet	%	Adet	%	Adet	%
Sucuk	8577	8003	93.31	Olumlu	1170	14.62	5571	69.61	1256	15.69	6	0.08
		574	6.69	Olumsuz	15	2.61	332	57.84	227	39.55	-	-
Pastırma	1507	1458	96.75	Olumlu	607	41.63	212	14.54	619	42.46	20	1.37
		49	3.25	Olumsuz	14	28.57	-	-	35	71.43	-	-

Tablo 2. Serolojik analiz değerleri

Serolojik analiz değerleri
<ul style="list-style-type: none">• Yabancı doku ya da iç organ vardır (kemik, fibröz kıkırdak).• Tükrük bezi ve yemek borusu (baş eti) tespit edildi.• Kıkırdak, kemik ve tükrük bezi (baş eti) tespit edildi.• Kanatlı eti (Pozitif)• Kıkırdak dokusu tespit edildi.• Kemik dokusu tespit edildi.• Yabancı doku, iç organ (meme dokusu) tespit edildi.• Deri dokusu saptanmıştır.• Yabancı doku ya da iç organ (akciğer, meme, hyalin, kıkırdak, yoğun damar kesitleri) vardır.• Hindi eti tespit edildi.• Tek tırnaklı eti tespit edildi.• Domuz eti tespit edildi.• Yabancı doku, iç organ (böbrek, yoğun kollojen doku) tespit edildi.• Yabancı doku ya da iç organ (hyalin kıkırdak, ligament, kemik) vardır.• Buffalo (Manda) eti (Pozitif)• At eti (Pozitif)• Yabancı doku ya da iç organ (sindirim sistemi organları, ligament) vardır.• Yabancı doku, iç organ (kalp, böbrek, dalak) tespit edildi.• Sakatat ve kıkırdak tespit edildi• Yabancı doku (özefagus) ve kıkırdak tespit edildi.• Kıl, tüy, deri tespit edildi.• Soya (lektin) geni tespit edildi.• Kanatlı Eti Aranması: Tespit Edildi.• Tavuk Eti Aranması: Tespit Edildi.• Hindi Eti Aranması: Tespit Edildi.

Denetimler sonucunda alınan sucuk örneklerine ait bazı kalite özellikleri

8 yıl boyunca alınan 8577 sucuk numunesine ait analiz sonuçlarının %93.31'inin olumlu, %6.69'unun ise olumsuz sonuçlandığı saptanmıştır (Tablo 1). Olumsuz analiz sonuçlarının mikrobiyolojik analizlerde %2.61, serolojik analizlerde %57.84, fizikokimyasal analizlerde %39,55 düzeylerinde olduğu tespit edilmiştir. Sucukta en fazla hile %57.84 ile serolojik analizlerde görülmüştür. Tablo 2 incelendiğinde serolojik analizlerde yapılan hilelerin genellikle; yabancı doku ya da iç organ (meme, hyalin, kıkırdak, yoğun damar kesitleri, sindirim sistemi organları, ligament vb.), tek tırnaklı eti, kanatlı eti vb. olduğu görülmektedir.

Gıda güvenliği; gıdalarda ortaya çıkabilecek her tür fiziksel, kimyasal ve biyolojik riskler ile tüm tehditlerden uzak, gıdanın kendi değerini kaybetmeden tüketime hazır bir şekilde bulunması şeklinde tanımlanmaktadır [30]. Araştırmamızda Tablo 3'de yer alan sucuk numunelerinin tamamının gıda güvenliğine uygun olduğu tespit edilmiştir. Denetimlerde alınan sucuk numunelerinde çeşitli duyuşsal, kimyasal ve mikrobiyolojik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda alınan sucuk numunelerine nitrat ve nitrit analizleri de yapılmış olup, elde edilen olumlu sonuçlar

Tablo 3'de yer almaktadır. Sucuk; kırmızı et ve yağın kıyılarak veya kuterde çekilerek, baharat ve çeşitli katkı maddeleri ilave edilmesi sonucu hazırlanan sucuk hamurunun, doğal veya yapay kılıflar içerisinde belirli sıcaklık, rutubet ve hava akımı koşullarında olgunlaştırılması ile elde edilen et ürünüdür [31]. Kürlenme işlemi, et ürünlerinin dayanıklılığının ve raf ömrünün artırılması, mikrobiyolojik güvenliğinin sağlanması amacıyla yaygın olarak uygulanan yöntemler arasında yer almaktadır. Kürlenme işlemi; tuz, nitrat, nitrit vb. katkı maddeleri ile çeşide göre baharatların eklenmesiyle renk, doku, tat, aroma, lezzet vb. özelliklerin iyileştirilmesi ve dayanıklılığın artırılması amacıyla uygulanmaktadır. Nitrit ve nitratlar gibi birçok antimikrobiyal maddenin, belirli limitler dahilinde et ürünlerinde kullanımına izin verilmektedir [32, 33]. Et, mikrobiyal bozulma açısından dayanıksız gıda maddeleri arasında yer almaktadır. Ancak sağlıklı ve yüksek verimli hayvanlardan, tekniğine uygun şekilde elde edilen etlerin kullanımı, ürünün başlangıç mikrobiyal yükünün düşük olmasına katkı sağlamaktadır. Üretim ve satış yerlerinde gıda ile temas halindeki personel hijyenine dikkat edilmesi, yetersiz veya yanlış hijyenik uygulamalar ve çapraz kontaminasyonun önlenmesi ile mikrobiyal katkıların gıdalara geçişi en az düzeylere düşürülebilecektir [2, 34].

Tablo 3. Denetim sonucu sucuk örneklerine ait olumlu analiz sonuçları

No	Numune Alınma Tar.	Numune Alınma Sayısı ve Oranı (%)	Sucuk Analiz Adı	Analiz Sonucu
1	2011	1283 % 16.03	*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELISA) *Domuz Eti/Geni Aranması *At Eti/Geni Aranması *Serolojik Test *pH *Nitrat Tayini (HPLC) *Nitrit Tayini (Spektrofotometrik) *Yabancı Madde Aranması *Kuru Madde Tayini *Rutubet Miktarı *Nişasta Aranması (kalitatif) *Yağ Tayini (Soxhalet) *Soya Geni Aranması * <i>E. coli</i> O157:H7 * <i>Bacillus cereus</i> * <i>Clostridium perfringens</i> Sayısı *Termotolerant <i>Campylobacter</i> *Küf *Küf - Maya Sayımı * <i>Salmonella</i> spp. * <i>Listeria monocytogenes</i> *Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i> *Stafilokokal enterotoksinler (Hızlı Test) * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin A * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin B * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin C * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin D * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin E	Olumlu
2	2012	1401 % 17.51	*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) *Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (AGİD) *At Eti/Geni Aranması *Domuz Eti/Geni Aranması *Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test) *GDO Tarama Testi * <i>E. coli</i> O157:H7 * <i>Listeria monocytogenes</i> * <i>Salmonella</i> spp. * <i>Bacillus cereus</i> * <i>Clostridium perfringens</i> Sayısı *Mezofilik Aerobik Bakteri *Sülfid indirgeyen <i>Clostridia</i> *Stafilokokal enterotoksinler (Hızlı Test) * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin A * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin B * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin C * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin D * <i>Staphylococcus</i> Enterotoksin E *Termotolerant <i>Campylobacter</i>	Olumlu

			<ul style="list-style-type: none">*Yabancı Madde Aranması*Nitrat Tayini (HPLC)*Nitrit Tayini (HPLC)*Rutubet Miktarı*Boya Aranması (Kalitatif)*Nişasta Aranması (kalitatif)*Yağ Tayini (Soxhalet)* Kalsiyum Tayini*pH*Benzoik Asit Tayini (HPLC)*Sorbik Asit Tayini (HPLC)*Potasyum sorbat*Sodyum Benzoat*Kokuşma Testi*Yağ Asitleri Kompozisyonu*ECN 42 Farkı Tayini (Tohum yağları analizi)*Sterol Kompozisyonu (GC)	
3	2013	1239 % 15.48	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELİSA)*At Eti/Geni Aranması*Domuz Eti/Geni Aranması*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*Soya Geni Aranması*<i>E. coli</i>*<i>Listeria monocytogenes</i> (Hızlı Test)*<i>Salmonella</i> Aranması (Hızlı Test)*<i>Bacillus cereus</i>*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*Stafilokokal enterotoksinler (Hızlı Test)*Yabancı Madde Aranması*Boya Aranması (Kalitatif)*Rutubet Miktarı*Nişasta Aranması (kalitatif)*Protein*Yağ Tayini (Soxhalet)*Asitlik*pH*Et/Yağ Oranı*Benzoik Asit Tayini (HPLC)*Nitrit Tayini (HPLC)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Kurşun Tayini*Pestisit Analizi*Renk ve görünüş*Duyusal Muayene	Olumlu
4	2014	979 % 12.23	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA)*Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELİSA)*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*At Eti/Geni Aranması*Bitki Spesifik Soya Geni Taraması*Soya Geni Aranması*<i>E. coli</i> O157*<i>Listeria monocytogenes</i>*<i>Salmonella</i> spp.*Küf-Maya Sayımı*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*<i>Bacillus cereus</i>*Küf*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)	Olumlu

				<ul style="list-style-type: none">*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Protein Tayin (Yakma Metodu)*Yağ Tayini Analizi*Net Ağırlık*Boya Aranması (Kalitatif)*Yabancı Madde Aranması*Sorbik Asit Tayini (HPLC)*pH	
5	2015	798 %9.97	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR)*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Küçükbaş Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELİSA)*At Eti/Geni Aranması*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*Soya Geni Aranması*E. coli O157 (Hızlı Test)*Listeria monocytogenes (Hızlı Test)*Salmonella spp.*Bacillus cereus*Enterobacteriaceae*Koagülaz Pozitif Staphylococcus*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*Yabancı Madde Aranması*pH*Yağ Tayini Analizi*Protein Tayini*Rutubet Miktarı*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Boya Aranması (Kalitatif)*Sorbik Asit Tayini (HPLC)*Benzoik Asit Tayini (HPLC)*Nişasta Miktarı	Olumlu	
6	2016	725 %9.06	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA)*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR)*At Eti/Geni Aranması*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*E. coli O157 (Hızlı Test)*Listeria monocytogenes (Hızlı Test)*Salmonella spp.*Boya Aranması (Kalitatif)*Soya Geni Aranması (ELİSA)*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Yabancı Madde Aranması*pH*Rutubet Miktarı*Tuz Tayini*Yağ Tayini Analizi*Protein Tayini*Nişasta Aranması	Olumlu	

7	2017	635 %7.94	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELİSA)*At Eti/Geni Aranması*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*Soya Geni Aranması*Yabancı Madde Aranması*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Yağ Tayini (Soxhalet)*Protein Tayini*E. coli O157 (Hızlı Test)*Listeria monocytogenes (Hızlı Test)*Salmonella spp.*Termotolerant Campylobacter*Sülfid indirgeyen anaerob bakterisi*Koagülaz Pozitif Staphylococcus	Olumlu
8	2018	769 %9.61	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR)*Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR)*At Eti/Geni Aranması*Serolojik Test*Soya Geni Aranması*E. coli O157 (Hızlı Test)*Listeria monocytogenes (Hızlı Test)*Salmonella spp.*Bacillus cereus*Koagülaz Pozitif Staphylococcus*Termotolerant Campylobacter*Sülfid indirgeyen anaerob bakterisi*Stafilokokal enterotoksinler (Hızlı Test)*Staphylococcus Enterotoksin A*Staphylococcus Enterotoksin B*Staphylococcus Enterotoksin C*Staphylococcus Enterotoksin D*Staphylococcus Enterotoksin E*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Rutubet Muhtevası*Yağ Tayini (Soxhalet)*Ham selüloz*Protein Tayin (Yakma Metodu)*Nişasta Aranması (kalitatif)*Et/Yağ Oranı*pH*Gözle Görülür Yabancı Madde*Benzoik Asit Tayini (HPLC)*Sorbik Asit Tayini (HPLC)*Boya Aranması (Kalitatif)*Ponceau 4R (HPLC)	Olumlu
9	2019	174 %2.17	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*At Eti/Geni Aranması*Serolojik Test*E. coli O157 (Hızlı Test)*Listeria monocytogenes (Hızlı Test)*Salmonella spp.*Bacillus cereus*Stafilokokal enterotoksinler (Hızlı Test)*Soya Geni Aranması*Yağ Tayini (Soxhalet)*Yabancı Madde Aranması*Protein Tayin*Ham Yağ Analizi	Olumlu

Nitrat ve nitrit miktarları Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği'nde (2013/28693) belirlenmiş olup, ısıtılmış işleme uygulanmamış işlenmiş etlerde maksimum 150 mg/kg nitrit; fermente sucuk ve pastırma dışındaki ısıtılmış işleme uygulanmamış etlerde maksimum 150 mg/kg nitrat, pişirilmiş et ürünlerinde maksimum 100 mg/kg nitrit, pişirilmiş et ürünleri hariç ısıtılmış işleme uygulanmamış etlerde maksimum 150 mg/kg nitrit kullanımına izin verilmektedir [35]. Tablo 4'de, 2011, 2014, 2015, 2016, 2017 ve 2018 yıllarındaki denetimler esnasında alınan sucuk numunelerinde, gerçekleştirilen nitrat ve nitrit analizlerinin TGK limitlerinin üzerinde olduğu için analiz sonucunun olumsuz olduğu belirtilen numuneler bulunmaktadır. Nitratın etkisini gösterebilmesi için, nitrite dönüşmesi gerekmektedir [36, 37, 38]. Nitratı, nitrite indirgeyen mikroorganizmalardan en önemlileri arasında Stafilokok ve Mikrokoklar bulunmaktadır [39]. Et ürünlerine, belirtilen limitlerin üzerinde nitrit ve/veya nitrat kullanılması, önemli sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Nitrat iyonlarının direkt toksik etkisi bulunmamakta, bakteriyel nitrat redüktaz

aktivitesi sonucu zararlı nitrit iyonlarına indirgenmektedir [40]. Nitrit, yasal olarak kullanılabilen tek toksik madde olması nedeniyle kirlenmiş et ürünlerine ilave edilmesi esnasında oldukça sıkı kurallar bulunmaktadır. Birçok ülkede, et ürünlerinde direkt kullanılması ve gıda işletmelerinde saf olarak nitrit bulunması yasaklanmıştır [41].

Türk Gıda Kodeksi (TGK) Et, Hazırlanmış Et Karışımları ve Et Ürünleri Tebliği (Tebliğ No: 2018/52) 2. bölüm 9. madde 7. bendinde belirtilen "Sucuğa, ısıtılmış işleme görmüş sucuğa ve pastırmaya et kaynaklı olmayan proteinler, nişasta ve nişasta içeren maddeler ile soya ve soya ürünleri katılamaz. Ancak baharat kaynaklı nişasta ve bitkisel protein miktarının toplamı kütlece %1'i aşamaz" ifadesi bulunmaktadır [42]. Tablo 4 incelendiğinde, 2011 ve 2012 yıllarında alınan sucuk numunelerinde "Nişasta Aranması" analiz sonuçlarının olumsuz olduğu numuneler bulunmaktadır. Nişasta aranması analizi konusundaki uygunsuzluk, diğer yıllarda tespit edilmemiş ve az sayıdaki numunede TGK limitlerinin aşıldığı saptanmıştır.

Tablo 4. Denetim sonucu sucuk örneklerine ait olumsuz analiz sonuçları

Sucuk				
No	Numune Alınma Tar.	Numune Alınma Sayısı	Analiz Adı	Analiz Sonucu
1	2011	92 %16.03	*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELİSA) *DNA İzolasyonu *Sorbik Asit Tayini (HPLC) *Yağ Tayini (Soxhalet) *Küf - Maya Sayımı *pH *Nitrat Tayini (HPLC) *Rutubet Miktarı *Nişasta Aranması (kalitatif) *Yağ Tayini (Soxhalet) *Soya Geni Aranması	Olumsuz
2	2012	113 %19.69	*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR) *Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELİSA) *Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması) *At Eti/Geni Aranması *Yağ Tayini (Soxhalet) *Nişasta Aranması (kalitatif) *Sodyum Benzoat *Rutubet Miktarı *Listeria monocytogenes *Salmonella spp. (Hızlı Test) *Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)	Olumsuz
3	2013	86 %14.98	*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini *Soya Geni Aranması *E. Coli *Listeria monocytogenes (Hızlı Test) *Salmonella Aranması (Hızlı Test)	Olumsuz

				*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Rutubet Miktarı *Protein *Yağ Tayini (Soxhalet) *pH *Et/Yağ Oranı *Sorbik Asit Tayini (HPLC)	
4	2014	60 %10.45		*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Küçükbaş Hayvan Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR) *Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) (ELİSA) *Listeria monocytogenes *Salmonella spp. *Rutubet Miktarı *Nitrat Tayini (HPLC) *Soya Geni Aranması *Protein *Yağ Tayini Analizi(Soxhalet)	Olumsuz
5	2015	39 %6.79		*pH *Protein Tayin (Yakma Metodu) *Nitrat Tayini (Spektrofotometrik) *Yağ Miktarı / Toplam Et Proteini Miktarı	Olumsuz
6	2016	38 %6.62		*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Küçükbaş Hayvan Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Soya Geni Aranması (ELİSA) *Listeria monocytogenes (Hızlı Test) *Nitrat Tayini (Spektrofotometrik) *Rutubet Miktarı *Ham Protein Tayini	Olumsuz
7	2017	71 %12.37		*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması) *At Eti/Geni Aranması *Et Tür Tayini *Listeria monocytogenes (Hızlı Test) *pH *Rutubet Miktarı *Nitrat Tayini (Spektrofotometrik) (HPLC) *Yağ Tayini (Soxhalet) *Protein Tayini	Olumsuz
8	2018	73 %12.72		*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR) *Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR) *Listeria monocytogenes (Hızlı Test) *Nitrat Tayini (Spektrofotometrik) *Rutubet Miktarı *Yağ Tayini (Soxhalet) *Sorbik Asit Tayini (HPLC) *Boya Aranması (Kalitatif)	Olumsuz
9	2019	2 %0.35		*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR)	Olumsuz

Et ve et ürünleri üzerinde bulunan etiket bilgileri, tüketiciler tercihleri üzerinde rol oynayan önemli faktörler arasındadır. Etiket bilgileri ile ürüne ait orijin bilgileri, resmi otoriteler tarafından yapılan kontroller, ürüne ait sertifikalar, besin öğeleri, bileşim, kullanılan katkı maddeleri ve üretim gerçekleştirilen ülke vb. bilgiler bulunmaktadır [43-45]. Sığır ve tavuk eti karışımlarında, tavuk eti miktarının yüksek

olması maliyetin düşmesinde önemli bir rol oynarken, raf ömrünün düşmesine, üründe tat, koku, aroma vb. kalite bozulmalarına neden olmaktadır. Tavuk etinde, *Salmonella spp.* yükü açısından daha yüksek bir risk bulunmaktadır. Sığır etine tavuk eti katılması, tüketicinin kandırılması ve etik değerlere uygun çalışan gıda üreticileri aleyhine haksız rekabete yol açmaktadır [46].

Bazı gıda üreticileri daha fazla kâr elde etme amacıyla bazı işletmeler tarafından et ürünleri içerisinde daha ucuz ikame maddeleri ilave edilmekte, çeşitli taklit ve tağşişler yapılmaktadır [47]. Dünya nüfusunda devam eden artış, et arzının tüketici talebini karşılayamaması vb. nedenlerle bu tür hile uygulamaları cazip hale gelmiş ve görülme sıklığında artış başlamıştır [48-50]. Etin hangi hayvan türünden elde edildiği; ürün maliyeti, gıda güvenliği, halk sağlığı, yasal gıda mevzuatı, inanç vb. nedenlerle önem arz etmektedir. Gıda etiketleme yönetmeliklerinde, kullanılan etlerin kaynaklarının doğru bildirilmesi istenmektedir [31, 51, 52]. Çalışmamıza benzer şekilde, Ankara'da et türlerinin araştırıldığı çalışmada, 37 sucuk örneğinden 5'inde (%13.5) kanatlı, 1'inde (%2.7) kanatlı ve tek tırnaklı etleri bulunduğu belirlenmiştir. Etiket bilgileri incelendiğinde, 15 (%14.7) örnekte, etiketlerinde belirtilmeyen et türlerinin bulunduğu saptanmıştır [53]. Araştırmada 2012 ve 2017 yıllarında alınan sucuk numuneleri arasında at eti karıştırıldığı tespit edilmiştir (Tablo 4). Mersin ve Adana piyasasından alınan 45'er adet ve kıyma, 20 adet sucuk ve 30 adet hamburger köfte örneğinde domuz ve at etlerinin varlığı araştırılmıştır. Analize tabi tutulan 140 et ve et ürünü örneğinin 4 tanesinde (%2.9) at eti bulunduğu saptanmıştır [54]. Özşensoy ve Şahin [26] tarafından sucuk, salam, sosis ve köfte örnekleri üzerinde yapılan araştırmaya göre, 2 salam ve 1 sucukta sığır eti olmadığı, 11 örnek içerisinde koyun/keçi eti kalıntısı olduğu ve 3 örnek içerisinde ise kanatlı eti kalıntısı bulunduğu tespit edilmiş, örneklerin hiçbirinde domuz, at ve karnivor kalıntısı bulunmadığı belirlenmiştir. Sucuk, salam, sosis vb. et ürünleri; üretim yöntemi, hammadde yapısı ve maliyetlerin yüksek oluşu nedeniyle taklit ve tağşişe açık et ürünleridir. Üretim esnasında, tüketimi arzu edilmeyen hayvan etlerinin (at, eşek vb.) kullanımı, çeşitli iç organların (kulak, işkembe, bağırsak, kalp, uterus, meme, testis vb.), bağ doku açısından zengin etlerin (tendo, ligament, fascia, kıkırdak) yüksek miktarlarda kullanımı, kaliteli ürün etiketi ile sunumu, bitkisel orijinli proteinlerin kullanımı ve son tüketim tarihi geçmiş et ürünlerinin tekrar homojenizasyonu gibi çeşitli hilelere rastlanabilmektedir [9, 55]. Çalışmada yer alan et tür tayinlerine ait veriler, genellikle literatür bulguları ile benzerlik göstermiştir.

Erzurum'da alınan et ürünlerine kas dokusu haricinde pek çok hayvansal doku bulunduğu belirlenmiş olup et ürünleri içerisinde arzu edilmeyen doku ve organların tespit edilmesinde histolojik muayenenin önemine vurgu yapılmıştır [56]. 2015 yılı hariç diğer tüm yıllarda alınan numunelerde, histolojik muayene sonuçlarının olumsuz bulunduğu sucuk örneklerine rastlanmıştır. Tablo 4'de görüldüğü üzere: 2011 yılında kanatlı eti, hindi eti, tavuk eti, soya geni; 2012 yılında kanatlı eti, tavuk eti, hindi eti, domuz eti, at eti; 2013 yılında tavuk eti, kanatlı eti, soya geni; 2014 yılında küçükbaş hayvan eti, kanatlı eti, tavuk eti, domuz eti, soya geni; 2016 yılında küçükbaş hayvan eti, tek tırnaklı hayvan eti, kanatlı eti, soya geni; 2017 yılında kanatlı eti, tek tırnaklı eti, at eti; 2018 yılında tek tırnaklı eti, kanatlı eti, domuz eti; 2019 yılında domuz eti tespit edilmiştir. Dana etinden üretilen sucuklara kanatlı eti karıştırılarak yapılan hileye daha sık rastlandığı tespit edilmiş olup, kanatlı eti

fiyatının dana etine kıyasla düşük olması nedeniyle karıştırıldığı düşünülmektedir. İran'da 5 farklı gıda işletmesine ait sucuk örneklerinin tamamında hiyalin kıkırdak, %20'sinde ise lenf bezi bulunduğu bildirilmiştir [57]. Erzurum'da alınan 20 sucuk örneğinde yapılan histolojik analizler sonucunda 6 adet sucuk örneğinde (%30) kıkırdak dokusu bulunduğu tespit edilmiştir [58]. Çalışmamızda sucuk örneklerinde belirlenen histolojik muayene sonuçları, literatürdeki veriler ile benzerlik göstermiştir (Tablo 4).

TGK Et, Hazırlanmış Et Karışımları ve Et Ürünleri Tebliği'ne göre sucukta pH değeri en yüksek 5.4 olmalıdır [42]. Çalışmada pH değeri TGK limit değerinin üzerinde bulunan ve analiz sonucu "Olumsuz" şeklinde bildirilen sucuk numunelerinin olduğu saptanmıştır (Tablo 4). Bu sucuk numunelerinin pH analiz değerlerinin ise resmi kayıtlarda 5.42-6.33 aralığında bulunduğu belirtilmiştir.

TGK Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği'nde Ek-1 Gıda Güvenilirliği Kriterleri tablosuna göre; "et ürünleri, ısı işlem görmemiş et ürünleri, fermente (sucuk vb.) ürünlerde *Salmonella* spp, *L. monocytogenes*, *E. coli* O157 bulunmamalıdır (0/25 g-mL)" şeklinde belirtilmiştir [59]. Çalışmada, denetimlerde alınan sucuk numuneleri arasında 2012, 2013, 2014, 2016, 2017 ve 2018 yıllarında *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp. ve *E. coli* analiz sonuçları olumsuz bulunan numuneler belirlenmiştir (Tablo 4). Bu mikroorganizmaların analiz değerleri, yapılan denetimlerin resmi kayıtlarında "Tespit Edildi" şeklinde yer almaktadır. *Salmonella* spp. ve *L. monocytogenes* gibi bazı gıda patojeni mikroorganizmalar fermentasyon, olgunlaştırma, kurutma vb. proseslerin ardından et ürünlerinde varlığını sürdürebilmektedir [60]. Özellikle et ve et ürünleri ile kontamine olan *Listeria*'lar insanlarda ciddi enfeksiyonlara neden olabilmektedir. Yalçın ve Can [61] tarafından 60 adet fermente sucuk örneği üzerinde yapılan bir çalışmada, 7 örnekte *L. monocytogenes*, örneklerin 10'unda koagülaz pozitif *S. aureus* ve 18'inde koliform grubu mikroorganizma tespit edilmiştir. Çalışmamızda sucuk örneklerine yapılan analizlerde, genellikle *L. monocytogenes* tespit edilmiş olup koagülaz pozitif *S. aureus* ve koliform grubu mikroorganizma tespit edilmemiştir.

Denetimler sonucunda alınan pastırma örneklerine ait bazı kalite özellikleri

Sekiz yıl boyunca alınan 1507 pastırma numunesine ait analiz sonuçlarının %96.75'inin olumlu, %3.25'inin ise olumsuz sonuçlandığı saptanmıştır (Tablo 1). Pastırmada gerçekleştirilen hile oranının sucuğa (%6.69) kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Pastırmada, %71.43 ile en yüksek düzeyde fizikokimyasal analizler sonucu hileye rastlanmış olup, serolojik analizler sonucunda herhangi bir hileye rastlanmamıştır. Anadolu'ya Selçuklular tarafından getirilen ve Orta Asya Türkleri'ne ait bir et ürünü olan pastırmada tuzlama (kürleme), kurutma ve baskılama işlemlerinin ardından etler çemenlenmektedir [62, 63]. Kürleme ve kurutma prosesleri ile su aktivitesi düşürülerek, güvenilir ve stabil bir ürün elde edilmektedir [35]. Kürleme maddelerinin antioksidan ve antimikrobiyal etkisi bulunmakta ve et ürünlerinin raf ömrünü uzatmaktadır. Aktivite gösteren

madde nitrit veya türevleridir [64, 65]. Tablo 5’de görüldüğü üzere, resmi denetimler sırasında alınan pastırma numunelerinde nitrat ve nitrit analizleri sonuçlarının uygun olduğu tespit edilmiştir. Tüketici alışkanlıklarında ortaya çıkan farklı eğilimler ve gıda güvenliğiyle ilgili artan endişe kamuda ve gıda sektöründe köklü değişikliklere yol açmıştır. Devlet konu ile ilgili mevzuat hazırlayarak denetimler gerçekleştirirken, gıda işletmeleri ise rekabette avantaj elde edebilmek amacıyla gıda güvenliğine yönelik yeni yaklaşımlar ve standartlar uygulamaktadır [66, 67]. Araştırmamızda Tablo 5’de yer alan pastırma numunelerinin tamamının gıda güvenliğine uygun olduğu tespit edilmiştir.

Kullanılan etin orijininin tespit edilmesinde; fiziksel, organoleptik, anatomik, histolojik, kimyasal, biyokimyasal, kromotografik, spektrofotometrik, elektroforetik, immünolojik, immunoelektroforetik, immunoenzimatik ve DNA temeline dayanan pek çok metot kullanılabilir [68]. Resmi denetimler sırasında alınan ve Tablo 5’de yer alan pastırma numunelerinin hiçbirinde at, eşek ve domuz eti gibi farklı tür hayvan DNA’sı tespit edilmemiştir. Yapılan bir araştırmada İstanbul’da toplanan 73 adet et ürünü analiz edilmiş olup, çalışmamıza benzer şekilde örneklerde at veya domuz etine rastlanmamıştır [69].

Tablo 5. Denetim sonucu pastırma örneklerine ait olumlu analiz sonuçları

No	Numune Alınma Tar.	Numune Alınma Sayısı	Pastırma	Analiz Adı	Analiz Sonucu
1	2011	260 %17.83		*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA) *Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil) *Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması) *Et Tür Tayini *At Eti/Geni Aranması *Kanatlı Eti/Geni aranması *Çemen miktarı(gravimetrik) *pH *Nitrat Tayini (HPLC) *Nitrit Tayini (Spektrofotometrik) *Benzo (a) piren *GDO Tanımlama Testi (35 S Promoter, Nos Terminatör, FMV Promotoru) *Organoleptik Muayene (Acı, Çürük, Kötü Kokuya ve Tada Sahip Daneler) *Duyusal Muayene *Rutubet Miktarı *Tuz Tayini *Serolojik Test *Kurşun Tayini *Kadmium *Benzo (a) piren *E. coli O157:H7 *Clostridium perfringens Sayısı *Bacillus cereus *Termotolerant Campylobacter *Küf *Küf - Maya Sayımı *Mezofilik Aerobik Bakteri *Salmonella spp. *Listeria monocytogenes *Staphylococcus aureus (TEMPO) *Koagülaz Pozitif Staphylococcus *Sülfid indirgeyen anaerob bakteri *Staphylococcus Enterotoksin A *Staphylococcus Enterotoksin B *Staphylococcus Enterotoksin C *Staphylococcus Enterotoksin D *Staphylococcus Enterotoksin E	Olumlu

2	2012	282 %19.34	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Hindi Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini*Domuz Eti/Geni Aranması*At Eti/Geni Aranması*Organoleptik (Duyusal) Analiz*Dioksin ve Dioksin Benzeri PCB ler Toplam (WHO-PCDD/F-PCB-TEQ)*E. coli O157:H7*Listeria monocytogenes*Salmonella spp.*Clostridium perfringens Sayısı*Aerobik Mikroorganizma Sayımı*Küf - Maya Sayımı*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Sülfid indirgeyen <i>Clostridia</i>*Stafilokokal enterotoksinler (Hızlı Test)*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin A*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin B*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin C*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin D*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin E *Nitrat Tayini (HPLC)*Nitrit Tayini (HPLC)*Kurşun Tayini*Civa*Kadmium*Boya Aranması (Kalitatif)*Nişasta Aranması (kalitatif)*Duyusal Muayene*Organoleptik (Duyusal) Analiz*pH*Benzoik Asit Tayini (HPLC)*Sorbik Asit Tayini (HPLC)	Olumlu
3	2013	126 %8.64	<ul style="list-style-type: none">*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini*At Eti/Geni Aranması*Soya Geni Aranması*PAH (Polyaromatik Hidro Karbonlar)*E. Coli*Clostridium perfringens Sayısı*Küf - Maya Sayımı*Salmonella Aranması (Hızlı Test)*Bacillus cereus*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*Organoleptik (Duyusal) Analiz*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*Kurşun Tayini*Kadmium*Duyusal Muayene*Tuz Tayini*Nişasta Aranması (kalitatif)*pH*Nitrit Tayini (HPLC)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Dioksin ve Dioksin Benzeri PCB ler Toplam (WHO-PCDD/F-PCB-*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin A*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin B*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin C*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin D*<i>Staphylococcus</i> Enterotoksin E	Olumlu

4	2014	119 %8.16	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA)*Et Tür Tayini (ELİSA)*<i>E. coli</i> O157*<i>Listeria monocytogenes</i>*<i>Salmonella</i> spp.*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*<i>Clostridium perfringens</i> Sayısı*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Boya Aranması (Kalitatif)*Tuz Tayini	Olumlu
5	2015	105 %7.20	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*At Eti/Geni Aranması*Et Tür Tayini*<i>E. coli</i> O157 (Hızlı Test)*<i>Listeria monocytogenes</i> (Hızlı Test)*<i>Salmonella</i> spp.*<i>Clostridium perfringens</i> Sayısı*<i>Bacillus cereus</i>*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Aerobik Koloni Sayısı*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*Dioksin ve Dioksin Benzeri PCB ler Toplam (WHO-PCDD/F-PCB-TEQ)*Dioksinler Toplamı (WHO-PCDD/F-TEQ)*İndikatör PCBs Toplamı (PCB 28,52,101,138,153,180) (ICES6)*Pestisit Analizi*PAH (Polyaromatik Hidro Karbonlar)*Yağ Asitleri kompozisyonu (Ekstrakte edilen yağda)*Antibiyotik Aranması*Kurşun Tayini*Kadmiyum*Çemen miktarı (gravimetrik)*Tuz Tayini*pH*Rutubet Miktarı*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Boya Aranması (Kalitatif)*Duyusal Muayene*Sorbik Asit Tayini (HPLC)*Benzoik Asit Tayini (HPLC)*Askorbik Asit Tayini (HPLC)	Olumlu
6	2016	66 %4.53	<ul style="list-style-type: none">*Ette Histolojik Muayene (Sucuk, Salam, Sosis, Köfte dahil)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA)*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Eşek Eti/Geni Aranması)*At Eti/Geni Aranması*Et Tür Tayini	Olumlu

			<ul style="list-style-type: none">*<i>E. coli</i> O157 (Hızlı Test)*<i>Listeria monocytogenes</i> (Hızlı Test)*<i>Bacillus cereus</i>*<i>Salmonella</i> spp.*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*Termotolerant <i>Campylobacter</i>*Bitki Spesifik Soya Geni Taraması*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Yabancı Madde Aranması*pH*Rutubet Miktarı*Tuz Tayini	
7	2017	419 %28.74	<ul style="list-style-type: none">*Et Tür Tayini (Kanatlı Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (ELİSA) (PCR veya RTPCR)*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Tavuk Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (DNA Microarray PCR)*Boya Aranması (Kalitatif)*Pestisit Analizi*PAH (Polyaromatik Hidro Karbonlar)*Organoleptik Muayene (Acı, Çürük, Kötü Kokuya ve Tada Sahip Daneler)*Serolojik Test (Kit ile Hızlı Test)*Kadmiyum*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Natamisin (HPLC)*Rutubet*Tuz Tayini*pH*Soya Geni Aranması*<i>E. coli</i> O157 (Hızlı Test)*<i>Listeria monocytogenes</i> (Hızlı Test)*<i>Salmonella</i> spp.*<i>Bacillus cereus</i>*Termotolerant <i>Campylobacter</i>*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>	Olumlu
8	2018	79 %5.42	<ul style="list-style-type: none">*Domuz Eti/Geni Aranması*Et Tür Tayini (Tek Tırnaklı Hayvan Eti/Geni Aranması)*Et Tür Tayini (Domuz eti Aranması) (PCR veya RTPCR)*<i>E. coli</i> O157 (Hızlı Test)*<i>Listeria monocytogenes</i> (Hızlı Test)*<i>Salmonella</i> spp.*<i>Bacillus cereus</i>*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>*Sülfid indirgeyen anaerob bakteri*Soya Geni Aranması*Nitrit Tayini (Spektrofotometrik)*Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)*Rutubet Muhtevası*Boya Aranması (Kalitatif)*Ponceau 4R (HPLC)	Olumlu
9	2019	2 %0.14	<ul style="list-style-type: none">*Et Tür Tayini*Domuz Geni Aranması	Olumlu

Denetimler esnasında alınan pastırma numunelerinde çeşitli kimyasal, duyuşsal ve mikrobiyolojik analizler gerçekleştirilmiş olup, tespit edilen olumlu sonuçlar **Tablo 5**'de yer almaktadır. Pastırmada mikrobiyota genellikle koagülaz (-) stafilokoklar ve laktik asit bakterileri tarafından oluşturulmaktadır. Üretim ve sonrası proses işlemleri esnasında pastırma mikrobiyotasında değişiklikler meydana

gelmektedir [35]. *L. monocytogenes* doğada sıklıkla karşılaşılan, NaNO₃ vb. kütleme maddelerine karşı kısmi dirence sahip, gıda kaynaklı patojen mikroorganizmalardan biridir [70]. Resmi denetimler sırasında alınan, **Tablo 5** ve **Tablo 6**'de yer alan pastırma numunelerinin hiçbirinde *E. coli* O157, *L. monocytogenes* ve *Salmonella* spp. tespit edilmemiştir.

Tablo 6. Denetim sonucu pastırma örneklerine ait olumsuz analiz sonuçları

Pastırma				
No	Numune Alınma Tar.	Numune Alınma Sayısı	Analiz Adı	Analiz Sonucu
1	2011	6 %12.25	*Sorbik Asit Tayini (HPLC) *Küf - Maya Sayımı *Rutubet Miktarı	Olumsuz
2	2012	5 %10.20	*Yabancı Madde Aranması *Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>	Olumsuz
3	2013	5 %10.20	*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i> *Rutubet Miktarı *Boya Aranması (Kalitatif)	Olumsuz
4	2014	1 %2.04	*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i>	Olumsuz
5	2015	11 %22.45	*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i> *Nitrat Tayini (Spektrofotometrik) *Nitrit Tayini (HPLC) *Tuz Tayini (Sodyum klorür) *Rutubet Miktarı	Olumsuz
6	2016	6 %12.25	*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i> *Çemen miktarı (gravimetrik) *Tuz Tayini (Sodyum klorür)	Olumsuz
7	2017	8 %16.33	*Çemen miktarı (gravimetrik) *Nitrat Tayini (Spektrofotometrik)	Olumsuz
8	2018	7 %14.28	*Koagülaz Pozitif <i>Staphylococcus</i> *Sülfid indirgeyen anaerob bakteri *Nitrat Tayini (Spektrofotometrik) *Boya Aranması (Kalitatif)	Olumsuz
9	2019	-	-	-

Benzer sonuçlar Büyükkunal vd. [6] tarafından da bildirilmiştir. Yapılan çalışmada, İstanbul, Adapazarı, Afyon ve Kayseri’de illerinden alınan 66 pastırma örneğinde yapılan mikrobiyolojik analizler sonucunda *Escherichia coli* O157 tespit edilmemiştir.

Domuz, kanatlı vb. etlerin sığır etine kıyasla maliyetinin daha düşük oluşu nedeniyle, yaygın olarak kırmızı et ile üretilen et ürünlerinin içerisine karıştırılarak yasa dışı üretim gerçekleştirilmektedir [47]. İstanbul’da yapılan bir araştırmada, 73 adet sos, köfte, salam, kıyma vb. et ürünü analiz edilmiş olup, 39 örnekte (%53.4) beyan dışı tavuk, hindi ve koyun eti içerdiği tespit edilmiştir [69]. Edirne, Tekirdağ ve İstanbul’da %100 sığır eti olduğu beyan edilen tost, hamburger ve pizzalarda sığır, kanatlı, domuz ve at eti arandığı çalışmada, 155 örnekten 2 tost örneği içerisinde at eti, %33’ünde tavuk eti bulunduğu saptanmış olup, örneklerin hiçbirinde domuz eti tespit edilmemiştir. Çalışma sonucunda incelenen her üç et ürününden birinde tağşiş yapıldığı belirlenmiştir [71]. İstanbul’da piyasaya sürülen

500 adet çiğ kıyma, lahmacun iç malzemesi ve kebab örneğinde, sığır, koyun, domuz, at, eşek, tavuk, kedi, köpek, hamamböceği, fare ve sineklere ait DNA örneği ve 52 örnek içerisinde koyun, tavuk ve at kalıntısına rastlanmıştır [72]. Tablo 6’de görüldüğü üzere çalışmamızda pastırma örneklerinde yapılan et tür tayini sonuçlarında, farklı hayvan türüne ait etlere rastlanmamış olup literatürle benzerlik göstermektedir. Literatür çalışmalarında genellikle salam, sos, köfte, lahmacun vb. et ürünlerinde yabancı dokulara rastlandığı tespit edilmiştir.

Denetimlerde 2015, 2017 ve 2018 yıllarında alınan pastırma numunelerinde yapılan nitrat ve nitrit analiz sonuçları limitlerin üzerinde tespit edilen numuneler tespit edilmiştir. Temel katkı maddelerinden biri olan nitrit, sağladığı diğer faydaların yanı sıra *Clostridium botulinum* olmak üzere patojen mikroorganizmaların inaktivasyonu amacıyla uzun yıllardır kullanılan kütleme maddesidir [73].

TGK Et, Hazırlanmış Et Karışımları ve Et Ürünleri Tebliği’ne göre pastırmadaki çemen miktarı kütlece en çok

%10 olmalıdır [42]. Tablo 6’da görüldüğü üzere 2016 ve 2017 yıllarında alınan pastırma numuneleri arasında çemen miktarı açısından olumsuz bulunan numuneler tespit edilmiştir. Bu numunelerin çemen miktarı analiz değerlerinin %12.2-23.8 aralığında ve TGK limitlerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Pastırmada kullanılan etlerin çemenlenme işlemiyle, çemen bileşiminde bulunan biyoaktif maddeler bazı patojen mikroorganizmaları inhibe ederken, etin yüzeyinde küf artışını önleyici aktivite göstermektedir [34]. Aynı zamanda çemenlenme işlemi ile pastırmada lezzet ve aroma oluşumu sağlanmaktadır [74]. Histolojik analizlerin et ve et ürünlerinde 1910’lu yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Jaeger tarafından ilk kez, histolojik preparatların mikroskopda incelenmesiyle, ürünü oluşturan doku türlerinin tespit edilebileceği bildirilmiştir [9]. Et ürünlerinde düşük değerli arzu edilmeyen et ve sakatatların kullanılması, kaliteli ürün üreten işletmelere karşı haksız rekabete yol açmakta, halk sağlığını tehdit etmekte ve tüketicinin aldatılmasına neden olmaktadır [8, 23, 74, 75]. Çalışmada resmi denetimler sırasında alınan pastırma numunelerinin hiçbirinde histolojik muayene sonucu tek tırnaklı, domuz, kıkırdak, meme dokusu vb. yabancı dokulara rastlanmamış olması sevindirici bir durumdur (Tablo 5, Tablo 6).

4 Sonuç

Et ve et ürünleri; fiyatının yüksek oluşu, üretimin zorluğu ve talebin karşılanamaması gibi nedenlerle yaygın bir şekilde taklit ve tağşiş yapılan önemli bir gıda grubudur. Limitlerin üzerinde gıda katkı maddesi kullanımı, mevzuata aykırı bileşen kullanımı, bitkisel kaynaklı protein kullanımı, düşük değerli arzu edilmeyen etlerin karıştırılması, elverişsiz üretim şartları vb. problemlere rastlanmaktadır. Sekiz yıl boyunca sucuk ve pastırmalardan toplam 10084 adet örnek alındığı, alınan 8577 adet sucuk örneğinden %93.31’inin olumlu, 6.69’unun olumsuz sonuçlandığı; alınan 1507 pastırma örneğinden ise %96.75’inin olumlu, %3.25’inin olumsuz sonuçlandığı tespit edilmiştir. Pastırmada gerçekleştirilen hile oranı sucuk örneklerine (%6.69) kıyasla daha düşük düzeydedir. Sucukta en yüksek düzeyde hile (%57.84) serolojik analizler sonucu ortaya çıkmıştır. Serolojik analizlerde yapılan hilelerin genellikle; yabancı doku veya iç organ (meme, hyalin, kıkırdak, yoğun damar kesitleri, sindirim sistemi organları, ligament vb.), tek tırnaklı eti, kanatlı eti vb. olduğu saptanmıştır. Pastırmada, en yüksek düzeyde (%71.43) fizikokimyasal analizler sonucu hileye rastlanmış olup, bunu mikrobiyolojik analizler (%41.63) takip etmiştir. Pastırmada gerçekleştirilen serolojik analizler sonucunda ise herhangi bir hileye rastlanmamıştır. Denetimler esnasında alınan sucuk örneklerinde en yüksek olumsuz analiz sonucu 2017 yılında tespit edilmiştir. Bu durumun, denetim esnasında diğer yıllara kıyasla daha az numune alınmasından kaynaklanılabileceği düşünülmektedir. 2015 yılı hariç tüm yıllarda alınan sucuk örneklerinde gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, daha ucuz olan et türlerinin karıştırıldığı saptanmıştır. Gıda ile ilgili sorunlar, yaşayan halkı değil gelecek nesiller üzerinde de risk oluşturmaktadır. Bu nedenle uluslararası, ulusal ve yerel ölçeklerde çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Sorunların çözümlenmesi, önleyici tedbirlerin alınması ve güvenilir gıda üretiminin sağlanması ancak etkili bir kontrol ve denetim ile mümkün olabilecektir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] M. A. Palabıçak, Türkiye’de kırmızı et sektörü ve geleceğe yönelik üretim ve tüketim dengesinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [2] P. M. C. C. Pereira and A. F. R. B. Vicente, Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet. *Meat Sci*, 93 (3), 586-592, 2013.
- [3] G. Campbell-Plat and P. E. Coe, *Fermented meats*. Chapman & Hall, 1995.
- [4] M. Flores, Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products. *Meat Science*, 144, 53-61, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.016>.
- [5] S. K. Büyükcünal, F. Ş. Şakar, İ. Turhan, Ç. Erginbaş, S. Sandıkçı Altunatmaz, F. Yılmaz Aksu, F. Yılmaz Eker and T. Kahraman, Presence of *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* 0157 and nitrate-nitrite residue levels in turkish traditional fermented meat products (sucuk and pastırma). *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 22 (2), 233-236, 2016. <http://dx.doi.org/10.9775/kvfd.2015.14238>.
- [6] R. Talon and S. Leroy, Fermented meat products and the role of starter cultures. Batt CA, Tortorello ML. eds. In: *Encyclopedia of Food Microbiology*. Amsterdam: Academic Press, Elsevier Ltd, 870-874, 2014.
- [7] A. Kumar, R. R. Kumar, B. D. Sharma and G. Palanisamy, Identification of species origin of meat and meat products on the DNA basis: A review. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 55, 1340-1391, 2015. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.693978>.
- [8] A. Yıldız, T. Karaca, Ö. Çakmak ve M. Yörük, R. Başkaya, İstanbul’da tüketime sunulan köftelerin histolojik, mikrobiyolojik ve serolojik kalitesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi* 15(1-2), 53-57, 2004.
- [9] Güçer L. ve Ş. Gövercin, Taklit veya tağşiş edilmiş et ve et ürünlerinin histolojik muayenesi. *Analiz* 35 (5), 24-28, 2010.
- [10] Ş. Kaymaz, A. Yurtyeri, U. Kanber, H. Çelik ve B. Yargülü, Ankara’da satılan hazır çiğ kıymalarda kas doku, bağ doku, iç organ ve yenmeyen dokuların saptanması. *AÜ Vet Fak Derg*, 36 (1), 40-52, 1989.
- [11] S. Malakauskienė, I. Alionienė, D. Džiugienė, V. Babrauskienė, C. Riedel, T. Alter and M. Malakauskas, Histological analysis for quality evaluation of cured meat sausages. *Vet Med Zoot*, 74, 96, 23-6, 2016.
- [12] Safefood 360, *Whitepaper food safety auditing principles and practice*. New York: Safefood 360, Inc. p 1-19, 2013.

- [13] WFP (2012), World Food Programme, Who are the Hungry? <https://www.wfp.org/zero-hunger>. Erişim Tarihi: 04 Temmuz 2020.
- [14] M. Beykaya, Türkiye’de gıda endüstrisinde gıda güvenliği ve denetimlerin rolü: Iğdır ili örneği. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10 (1), 260-270, 2020. <https://doi.org/10.21597/jist.581593>.
- [15] FAO and WHO, Codex Alimentarius Commission Procedural Manual, Twenty-Fourth Edition, ISBN 978 92-5-108928-6, Rome, 231p., 2015.
- [16] M. Tayyar, Güvenli gıda gereksinimi, Dünya Gıda Dergisi, 2014 (9), 34-37, 2014.
- [17] T. Lääkkö-Roto, J. Lundén, J. Heikkilä and M. Nevas, Prerequisites for effective official food control, Food Control, 37, 172-179, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.043>.
- [18] T. Lääkkö-Roto and M. Nevas, Auditing local official food control: perceptions of auditors and auditees. Food Control, 37, 135-140, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.09.021>.
- [19] K. Kettunen, S. Pesonen, J. Lundén and M. Nevas, Consistency and risk-basis of using administrative enforcement measures in local food control. Food Control, 85, 199-211, 2018.
- [20] Anonim 2023a. Resmi numune alma prosedürü uygulamaları <https://ankara.tarimorman.gov.tr/Belgeler/Kalite%20Y%C3%B6netimi%20Sistemi/Prosed%C3%BCrler/RESM%C4%B0%20NUMUNE%20ALMA%20PROSED%C3%9C%C3%9C.pdf> (Erişim Tarihi 14.04.2023)
- [21] Anonim 2023b. Et ve et mamulleri (kırmızı etler)-Laboratuvar analiz yöntemleri- Genel <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073101050068055112122076105077117116> (Erişim Tarihi 14.04.2023).
- [22] G. N. Bookwalter, Soy protein utilization in food systems. Advances in Experimental Medicine and Biology, 105, 749-766, 1978.
- [23] Ö. T. Erdoğan, Kahramanmaraş’ta satılan sucuk ve sosislerin histolojik yapısının incelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 5 (2), 9-13, 2002.
- [24] E. W. Lusas and M. N. Riaz, Soy protein products processing and use. Journal of Nutrition. 125, 573-580, 1995.
- [25] Y. Öznurlu, İ. Çelik, E. Sur ve T. Telatar, Et ve et ürünleri histolojisi ders notları, Konya, 2007.
- [26] Y. Özşensoy ve S. Şahin, Et ürünlerinde tür tayininin yapılmasında farklı yöntemlerin karşılaştırılması. Eurasian J Vet Sci, 32, 1, 30-5, 2016. <https://doi.org/10.15312/eurasianjvetsci.2016115447>
- [27] E. Rencova ve B. Tremlova, ELISA for detection of soya proteins in meat products. Acta Veterinaria Brno, 78, 667-671, 2009. <https://doi.org/10.2754/avb200978040667>.
- [28] E. Sincer ve H. Şenyuva, Et ve et ürünlerinde tağış ve orjinallik. Analiz 35 Dergisi 7, 12-13, 2010.
- [29] Ö. Yaman, Y. Öznurlu, İ. Çelik, M. F. Aydın, E. Kutlu, S. Karaman and K. Ilık, Histological survey on the tissue types in the Turkish fermented suaseges consumed in Konya. 5 th International Veterinary Medicine Students Scientific Research Congress, İstanbul, Türkiye, 8-10 May 2003.
- [30] G. Paçacı, Dünya’da ve Türkiye’de iklim değişikliği kaynaklı gıda güvenliği sorunu. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [31] M. A. Cebirbay, Fermente ve ısıl işlem uygulanmış sucuklarda bazı *Lactobacillus* ve patojen bakterilerin antibiyotik dirençliliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
- [32] G. Yıldız-Turp ve Ç. Sucu, Et ürünlerinde nitrat ve nitrit kullanımına alternatif yöntemler. CBÜ Fen Bilimleri Dergisi, 12 (2), 231-242, 2016. <https://doi.org/10.18466/cbujos.70961>.
- [33] B. E. Bingöl ve K. Bostan, Bir gıda katkı maddesi olarak laktatların et ve et ürünlerinde kullanımı. İstanbul Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 38 (1), 79-88, 2012.
- [34] A. Dışhan, H. Yetim ve Z. Gönülalan, Pastırma mikrobiyotası. Bozok Vet Sci, 2, (2), 115-125, 2021.
- [35] Türk Gıda Kodeksi (TGK), Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği Resmi Gazete Sayı: 28693, 2013.
- [36] K. O. Honikel, The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products, Meat Science, 78, 68-76, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.030>.
- [37] H. Y. Gökcalp, M. Kaya ve O. Zorba, Et ürünleri İşleme Mühendisliği, Erzurum, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Tesisi, 2010.
- [38] J. J. Sindelar and A. L. Milkowski, Human safety controversies surrounding nitrate and nitrite in the diet, Nitric Oxide, 26, 259-266, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2012.03.011>.
- [39] W. P. Hammes, Metabolism of nitrate in fermented meats: The characteristic feature of a specific group of fermented foods, Food Microbiology, 29, 151-156, 2012. DOI: [10.1016/j.fm.2011.06.016](https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.06.016).
- [40] Ö. Özdestand ve A. Üren, Gıdalarda nitrat ve nitrit. Akademik Gıda Dergisi, 8 (6), 35-43, 2010.
- [41] D. Demeyer, K. Honikel and S. De Smet, The world cancer research fund report: a challenge for the meat processing industry. Meat Science, 80, 953-959, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.06.003>.
- [42] Türk Gıda Kodeksi (TGK), Et, hazırlanmış et karışımları ve et ürünleri tebliği (Tebliğ No: 2018/52). Resmi Gazete, Sayı: 30670, 2018.
- [43] W. Verbeke, P. Rutsaert, K. Bonne and I. Vermeir, Credence quality coordination and consumers’ willingness-to-pay for certified halal labelled meat. Meat Science, 95, 790-797, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.042>.
- [44] F. Fernqvist and L. Ekelund, Credence and the effect on consumer liking of food. Food Qual and Prefer, 32,

- 340-353, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.10.005>.
- [45] M. Font-i Furnols and L. Guerrero, Consumer preference, behavior and perception about meat and meat products: An overview. *Meat Sci*, 98 (3), 361-371, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.025>.
- [46] Y. Ayaz, N. D. Ayaz, M. Aksoy ve Y. Z. Kaplan, Real-Time PCR tekniği ile çeşitli et ürünlerinde tavuk ve sığır eti oranlarının kantitatif tayini. *Etlik Vet Mikrobiyol Derg*, 24, 41-48, 2013.
- [47] D. Araç, H. Dıran ve S. Güner, Et ve et ürünlerinde tür tayininde kullanılan bazı kromatografik yöntemler. *Helal ve Etik Araşt. Derg.* 4 (1), 62-70, 2022. <https://doi.org/10.51973/head.1118666>.
- [48] M. A. Sentandreu and E. Sentandreu, Authenticity of meat products: Tools against fraud. *Food Research International*, 60, 19-29, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.030>.
- [49] H. Bo, M. Xianrong, Z. Liyuan, G. Jinyue, L. Shaowen and J. Hui, Development of a sensitive and specific multiplex PCR method for the simultaneous detection of chicken, duck and goose DNA in meat products. *Meat Sci*, 10, 90-94, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.11.007>.
- [50] Ö. İşleyici, Y. C. Sancak, R. M. Tuncay, A. Mis and F. Arslan, Van ilinde satılan salam, sosis ve sucuklarda kanatlı ve tek tırnaklı etlerinin varlığının ELISA tekniği ile araştırılması. *Van Vet J*, 28 (2), 107-111, 2017.
- [51] S. B. Ong, M. I. Zuraini, W. G. Jurin, Y. K. Cheah, R. Tunung, L. C. Chai, Y. Haryani, F. M. Ghazali and R. Son, Meat molecular detection: Sensitivity of polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism in species differentiation of meat from animal origin. *ASEAN Food Journal*, 14 (1), 51-59, 2007.
- [52] A. Doosti, P. G. Dehkordi and E. Rahimi, Molecular assay to faud identification of meat products. *J Food Sci and Tech*, 51 (1), 148-152, 2007. DOI 10.1007/s13197-011-0456-3.
- [53] E. Keyvan, I. Kul and U. Tansel, Identification of meat species in different types of meat products by PCR. *Ankara Üniv Vet Fak Derg*, 64, 261-6, 2017. DOI: [10.1501/Vetfak_0000002809](https://doi.org/10.1501/Vetfak_0000002809).
- [54] H. Yalçın ve G. Alkan, Et ve et ürünlerinde at ve domuz eti varlığının uhlenhuth presipitasyon halka, agar gel immuno diffuzyon ve enzyme linked immuno sorbent assay metotları ile araştırılması. *Kafkas Univ Vet Fak Derg*, 18 (6), 923-927, 2012. DOI: [10.9775/kvfd.2012.6615](https://doi.org/10.9775/kvfd.2012.6615)
- [55] A. Arslan, Et Muayenesi ve Et Ürünleri Teknolojisi. İkinci Baskı, Medipress Yayıncılık, Malatya, Türkiye, 2013.
- [56] E. İnce, Fermente Ve Isıl İşlem Görmüş Sucuklarda Histolojik İncelemeler. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [57] R. Latorre, J. Sadeghinezhad, B. Hajimohammadi, F. Izadi and M.T. Sheibani, Application of morphological method for detection of unauthorized tissues in processed meat products. *Journal of Food Quality and Hazards Control*, 2, 71-74, 2015.
- [58] S. K. Altun, A. Temur A ve İ. Ş. Harem, Erzurum ilinde satışa sunulan fermente sucuk ve sosislerin histolojik muayenesi. *Harran Üniv Vet Fak Derg*, 4 (2), 73-9, 2015.
- [59] Türk Gıda Kodeksi (TGK), Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği Resmi Gazete Sayı: 28157, 2011.
- [60] R. Talon, S. Leroy and I. Lebert, Microbial ecosystems of traditional fermented meat products: The importance of indigenous starters. *Meat Science*, 77, 55-62, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.023>.
- [61] H. Yalçın ve Ö. P. Can, Geleneksel yöntemle üretilen sucuklarda *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* ve Koliform varlığının araştırılması. *Kafkas Univ Vet Fak Derg*, 19 (4), 705-708, 2013. DOI: [10.9775/kvfd.2013.8610](https://doi.org/10.9775/kvfd.2013.8610)
- [62] G. Kaban, Sucuk ve pastırma: Microbiological changes and formation of volatile compounds. *Meat Science*, 95, 912-918, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.03.021>.
- [63] B. Kılıç, Current trends in traditional Turkish meat products and cuisine. *LWT-Food Science and Technology*, 42, 1581-1589, 2009. doi:10.1016/j.lwt.2009.05.016.
- [64] W. Vösgen, 1992, Curing: Are nitrite and nitrate necessary or superfluous as curing substances? *Fleischwirtschaft*, 72 (12), 1675-1678, 1992.
- [65] K. O. Honikel, Principles of curing. In: *Handbook of Fermented Meat and Poultry*, UK, Blackwell Publishing, 2007.
- [66] D. Bilalis, I. Stathis, A. Konstantas and S. Patsiali, Comparison between HACCP and ISO 22000 in Greek organic food sector. *Journal of: Food Agriculture & Environment*, 7 (2), 237-242, 2009.
- [67] S. Ötleş, Gıda sertifikasyon ve yeni bir yaklaşım olarak gıda güvenliği kültürü. *TuttoFOOD Grow Own Your Business 3-6 May 2015 Milano*, 2015.
- [68] S. Rahmati, N. M. Julkapli, W. A. Yehye and W. J. Basirun, Identification of meat origin in food products-A review. *Food Control*, 68, 379-390, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.04.013>.
- [69] H. Özpınar, G. Tezmen, I. Gökçe and İ. H. Tekiner, Detection of animal species in some meat and meat products by comparatively using DNA microarray and real time PCR methods. *Kafkas Univ Vet Fak Derg*, 19 (2), 245-252, 2013. DOI: [10.9775/kvfd.2012.7616](https://doi.org/10.9775/kvfd.2012.7616).
- [70] R. A. Menéndez, E. Rendueles, J. J. Sanz, J. A. Santos and M. C. García-Fernández, Physicochemical and microbiological characteristics of diverse Spanish cured meat products. *CyTA-Journal of Food*, 16, 199-204, 2018. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1379560>.
- [71] S. Atalay, S. Kök ve Y. Avcıbaşı, Et ürünlerinde farklı hayvan türlerinin ELISA tekniği ile tespit edilmesi. *Türkiye 12. Gıda Kongresi, Edirne, Türkiye, 05-07 Ekim 2016*.
- [72] H. Cerit, E. Dümen, F. H. Sezgin, S. Ergin and G. M. Bayrakal, PCR assay for identification of animal

- species in different ready to eat raw meat samples. *Kafkas Univ Vet Fak Derg*, 21, 777-779, 2015. DOI: 10.9775/kvfd.2015.13276.
- [73] W. Bedale, J. J. Sindelar and L. A. Milkowski, Dietary nitrate and nitrite: Benefits, risks, and evolving perceptions. *Meat Science*, 1-37, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.009>.
- [74] M. Atasever, İ. Çelik, A. Keleş ve M. Boydak, Fermente sucuklardaki doku tiplerinin histolojik yöntemlerle belirlenmesi, *Veteriner Bilimleri Dergisi*, 15 (1), 147-154, 1999.
- [75] T. İnal, Besin hijyeni hayvansal gıdaların sağlık kontrolü. 2. Baskı, Final Ofset Anonim Şirketi, İstanbul,1992.





2023 Kahramanmaraş ve Hatay depremlerinin Antakya ve Samandağ ilçelerindeki yapısal etkileri ve çözüm önerileri

Structural effects of 2023 Kahramanmaraş and Hatay earthquakes in Antakya and Samandağ districts and solution suggestions

İsmet Vapur^{1,*} , İlker Fatih Kara² , Emre Akın³ 

^{1,2,3} Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin, Türkiye

Öz

06.02.2023 tarihinde Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde yerel saat 04:17'de Mw: 7.7 büyüklüğünde ve yerel saat 13:24'de Mw: 7.6 büyüklüğünde olan Kahramanmaraş merkezli iki adet büyük şiddetli depremler meydana gelmiştir. Bu depremlerden sonra 20.02.2023 tarihinde Ölü Deniz Fayı üzerinde yerel saat 20:04'te Mw: 6.4 büyüklüğünde Hatay merkezli yıkıcı bir deprem daha meydana gelmiştir. Bu depremlerden en çok etkilenen bölgelerin başında Hatay ili gelmektedir. Bu çalışmada depremden sonra Hatay'ın Antakya ve Samandağ ilçelerinde bulunan yapılarındaki hasarlar gözleme dayalı olarak değerlendirilmiştir. Oluşan hasarların sayısı göz önüne alındığında bölgedeki yapı stoğunun depreme karşı yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Deprem yönetmeliklerine uygun olarak yapılan binaların yıkılmadığı ve diğer binalara göre daha az hasar aldığı belirlenmiştir. Bu durum deprem tasarım yönetmeliklerinin yeterli olduğunu ancak yapıların uygulamada yönetmeliklere uygun olarak inşa edilmediğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Deprem, Betonarme yapı, Taşıyıcı sistem, Hasar tipleri, Yapı davranışı

1 Giriş

6 Şubat 2023'te DAFZ üzerinde ilki yerel saat ile 04:17'de ve ikincisi yerel saat ile 13:24'de olmak üzere dokuz saat arayla Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) verilerine göre [1] moment büyüklükleri (Mw) 7.7 ve 7.6 olan iki deprem meydana gelmiştir. Merkez üsleri Pazarcık-Kahramanmaraş ve Ekinözü-Elbistan-Kahramanmaraş olan depremlerden sonra, 20 Şubat 2023 saat 20:04'te merkez üssü Hatay-Defne olan Mw değeri 6.4 büyüklüğünde bir deprem daha meydana gelmiştir. Bu depremlerden sonraki bir aylık süreçte bölgede 25000'den fazla artçı sarsıntı meydana gelmiştir. Ana depremlerden sonra olan artçı sarsıntılar Şekil 1'de [2, 3] verilen haritada gösterilmiştir. Depremler sonucu Kahramanmaraş, Adıyaman, Hatay, Osmaniye, Gaziantep, Kilis, Şanlıurfa, Diyarbakır, Malatya, Adana ve Elazığ illerinde bulunan yapılarda hasarlar oluşmuş, 50000'den fazla can kaybı yaşanmıştır.

Depremden en çok etkilenen illerin başında Hatay gelmektedir. Hatay ili Türkiye'nin en eski yerleşim

Abstract

On 06.02.2023, two major earthquakes with a magnitude of Mw: 7.7 at 04:17 local time and Mw: 7.6 magnitudes at 13:24 local time in the center of Kahramanmaraş occurred in the Eastern Anatolian Fault Zone. Following these earthquakes, another destructive earthquake with a magnitude of Mw: 6.4 centered in Hatay occurred on February 20, 2023, at 20:04 local time, on the Dead Sea Fault. Hatay province is one of the regions most affected by these earthquakes. In this study, the damage to the structures in the Antakya and Samandağ districts of Hatay after the earthquake was evaluated based on observation. Considering the number of damages, it is understood that the building stock in the region is insufficient against earthquakes. It was determined that the buildings constructed in accordance with the earthquake regulations did not collapse and were less damaged than the other buildings. This situation shows that the earthquake design regulations are sufficient, but the structures are not built in accordance with the regulations in practice.

Keywords: Earthquake, Reinforced concrete structure, Load-carrying system, Damage types, Structure behavior

yerlerinden biridir. İlin nüfusu 2022 yılındaki Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) [4] verilerine göre 1686043'tür. Kahramanmaraş-Pazarcık'ta gerçekleşen 7.7 büyüklüğündeki depreme 144 km mesafede, Kahramanmaraş-Elbistan'da gerçekleşen 7.6 büyüklüğündeki depreme 229 km mesafede bulunan Hatay ilinde 20 Şubat 2023'te gerçekleşen 6.4 büyüklüğündeki depremden sonra 51000'den fazla bina ağır hasar almış veya göçme meydana gelmiştir. Ayrıca depremler sonrasında Hatay Havalimanı pisti hasar almış, İskenderun Limanı rıhtımında çökme meydana gelmiş ve bu durum yangına neden olmuştur.

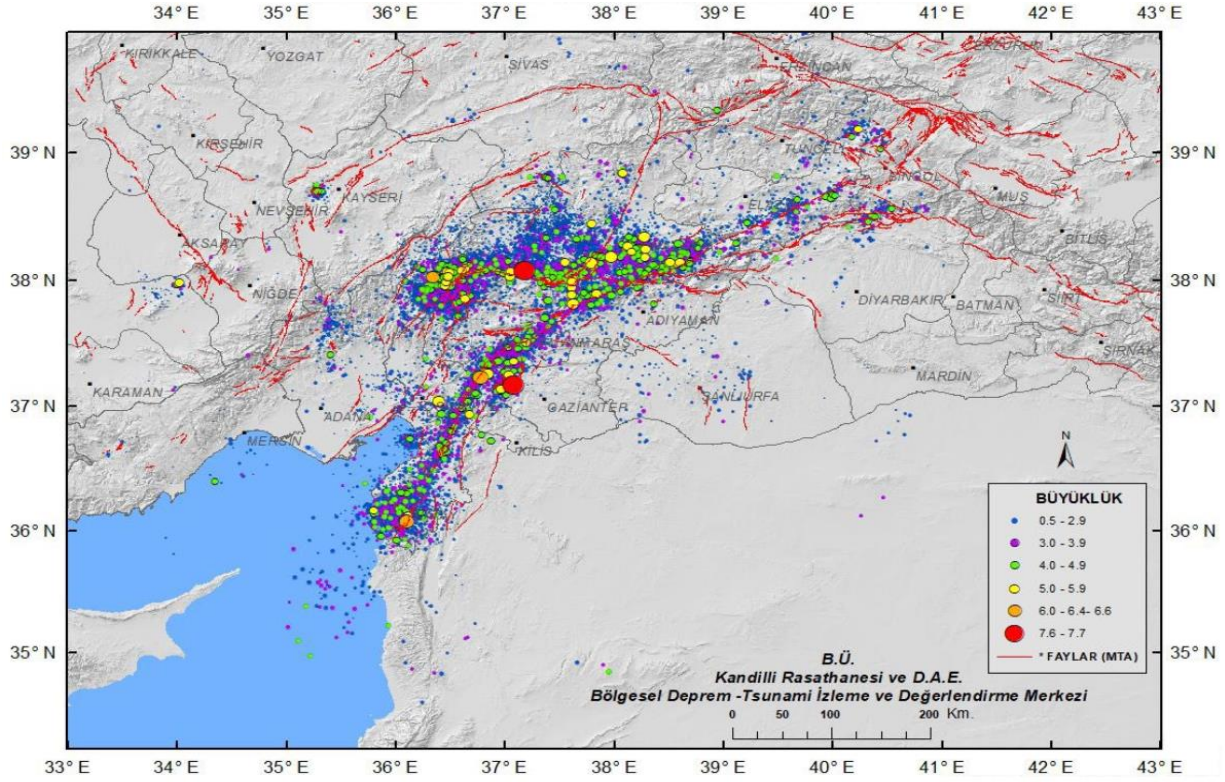
1.1 Bölgenin genel jeolojik yapısı

DAFZ, kuzeye doğru hareket eden Arap Plakası ile batıya doğru hareket eden Anadolu Bloğu arasında, sol yönlü atımlı bir fay sistemidir. 580 km uzunluğundaki bu fay sistemi, Bingöl-Karlıova bölgesinde Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ile Hatay-Antakya bölgesinde Ölü Deniz Fayı ile birleşmektedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ismetvapur@mersin.edu.tr (İ. Vapur)

Geliş / Received: 08.05.2023 Kabul / Accepted: 13.07.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1293147



Şekil 1. Ana depremden sonra 350 km yarıçaplı bölgede oluşan depremler [2, 3]

KAFZ'dan sonra ülkemizdeki en büyük fay sistemi olup, bu fay üzerinde tarihi kaynaklara göre sığ ve etkin depremler meydana gelmiştir.

Hatay Şehri, Antakya-Samandağ grabeni (çöküntü) içinde yer alır ve tektonik rejimi farklı zemin özelliklerine sahiptir. Bu graben, Asi Nehri'nin Akdeniz ile Amik Ovası arasındaki vadisini oluşturur ve genişliği 10-20 km arasındadır. Grabenin doğusunda Kel Dağı (1729 m), kuzeyinde Habibineccar Dağı (509 m) ve batısında Amanos Dağları (2250 m) gibi horstlarla sınırlanmıştır. Bu horstlar, temel kaya oluşumlarını oluştururlar. (Şekil 2) Şehirdeki yerleşimlerin çoğu, grabenin tabanındaki dolgu alanları üzerinde yer almaktadır [5].

Antakya, Paleozoyik ve Mesozoyik çağlardan oluşan iki farklı kaya serisi ve Erken Pliyosen döneminde oluşan Karasu vadisi sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu alanda yaklaşık olarak 1300 metrelik genç Senozoyik çağa ait çökeller bulunmaktadır. Miyosen döneminde oluşan birikimlerin üstüne Pliyo-Kuvaterner çağlarına ait sedimanlar ve Kuvaterner çağına ait volkanikler yerleşmiştir. Antakya bölgesindeki sedimanlar ise temel olarak alüvyonlu birimler içinde kil, kum ve çakıldan oluşmaktadır [6]. Bu alüvyon birimler, Amik Ovası'nda yaygın bir şekilde bulunur ve İskenderun ilçesi yakınlarındaki sahil kesimlerinde de görülür. Alüvyon birimler, gri ve açık gri renkli, çakıl, kum, kil ve silt içerir. Alüvyon tabakalarının kalınlığı, Amik Ovası'nın kenarlarından (15-30 m) ortaya ve kuzeyden (140 m) güneye (300 m) doğru belirgin bir şekilde artar [5, 7, 8].

2 Materyal ve metot

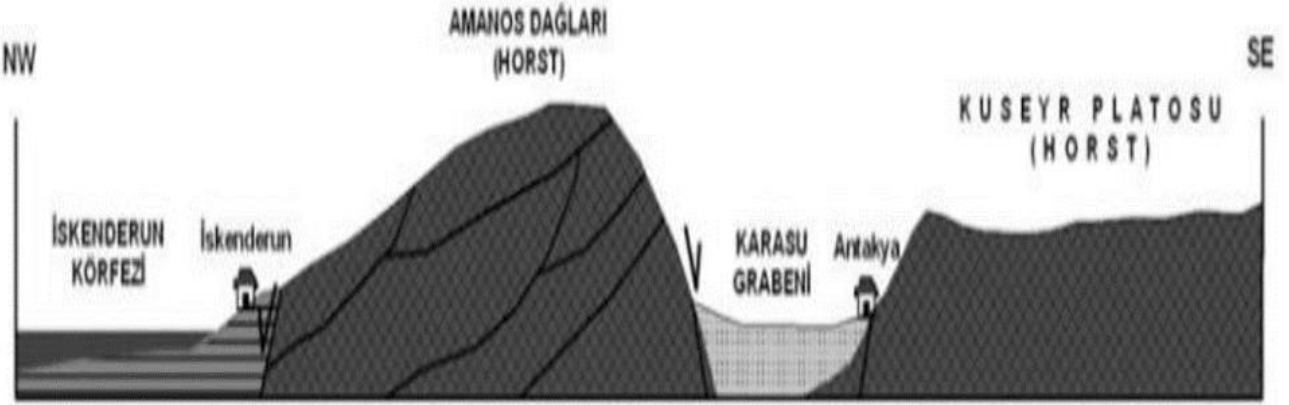
Çalışmada, 2023 yılında meydana gelen Kahramanmaraş ve Hatay depremlerinden sonra Antakya ve Samandağ ilçelerinde hasar gören betonarme yapılarda gözleme dayalı incelemeler sonucu hasar nedenleri ve çözüm önerileri tartışılmaktadır. Bu kapsamda bölgedeki farklı istasyonlardaki ivme değerleri incelenmekte ve gözleme dayalı yapılan incelemeler yapı hasarları detaylı olarak ele alınmaktadır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Kuvvetli yer hareketinin incelenmesi

6 Şubat 2023 tarihinde yerel saat 04:17'de gerçekleşen Mw=7.7 büyüklüğündeki ve 20 Şubat 2023 tarihinde yerel saat 20:04'te gerçekleşen Mw=6.4 büyüklüğündeki depremler Türkiye'de bulunan birçok deprem kayıtlı istasyonu tarafından kaydedilmiştir. Kahramanmaraş merkezli Mw=7.7 büyüklüğündeki depremin Hatay-Antakya'da bulunan 3126 ve 3129 No'lu istasyonlardaki ve Hatay merkezli Mw=6.4 büyüklüğündeki depremin Hatay-Antakya'da bulunan 3125 No'lu istasyondaki ivme kayıtları, AFAD-TADAS [9] veri tabanından alınarak bu yer hareketinin %5 sönüm oranı için her iki doğrultudaki ivme spektrumları oluşturulmuştur.

3126 istasyonu merkez üssüne 143.54 km mesafede ve zemin sınıfı ZD'dir. Bu istasyondaki maksimum yer ivmeleri kuzey-güney yatay yönde 1178.116 cm/s², doğu-batı yatay yönde 999.383 cm/s² ve düşey yönde 921.568 cm/s²'dir. 3129 numaralı istasyon merkez üssüne 146.39 km mesafede ve zemin sınıfı ZC'dir.



Şekil 2. Antakya bölgesinin jeomorfolojik kesit görünüşü [10]

Bu istasyondaki maksimum yer ivmeleri kuzey-güney yatay yönde 1351.5 cm/s^2 , doğu-batı yatay yönde 1198.743 cm/s^2 ve düşey yönde 716.938 cm/s^2 'dir. 3125 numaralı istasyon ise merkez üssüne 24.5 km mesafede ve zemin sınıfı ZC'dir. Bu istasyondaki maksimum yer ivmeleri kuzey-güney yatay yönde 775.396 cm/s^2 , doğu-batı yatay yönde 764.984 cm/s^2 ve düşey yönde 457.248 cm/s^2 'dir.

Bu istasyonlarda %5 sönüm oranı ile elde edilen tepki spektrumları, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) [11] verilen 2475 yıl ve 475 yıl tekrarlanma periyotlarına sahip DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyleri için belirlenmiş elastik tasarım spektrumları ile Şekil 3'de karşılaştırılmıştır. 3126 ve 3129 numaralı istasyonlarda, kuzey-güney ve doğu-batı yatay yönlerindeki spektral ivme değerleri, 0.1-0.4 saniye aralığındaki periyot değerleri için 2475 yıllık tekrarlanma periyoduna karşılık gelen tasarım spektrumunun üzerindedir. Ayrıca çok daha geniş periyot aralığında tekrarlanma periyodu 475 yıl olan elastik tasarım spektrumunu aşmıştır. 3125 istasyonunda ise kuzey-güney ve doğu-batı yatay yönlerindeki spektral ivme değerleri geniş periyot aralığında tekrarlanma periyodu 475 yıl olan elastik tasarım spektrumunu aşmıştır.

3.2 Betonarme yapılarda oluşan hasar tipleri

3.2.1 Malzeme nedeniyle oluşan hasarlar

Betonarme yapılarda kullanılan yapı malzemeleri oldukça kritik bir öneme sahiptir. Yönetmeliklere uygun olmayan malzeme kullanımı beton kalitesini etkilemekte ve basınç dayanımının düşük olmasına neden olmaktadır [12]. Böylece beton ile donatı arasındaki aderans kaybolmakta, deprem anında oluşan gerilmelerde donatılar betondan kolaylıkla sıyrılmaktadır. Donatıların akma konumuna gelmeden sıyrılmaları kiriş ve kolonların enerji tüketme kapasitesini azaltmaktadır. Bu tür problemlerden dolayı TBDY-2018 [11] ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) [13] hazır beton kullanılmasını zorunlu kılmıştır [14].

Betonda karşılaşılan başka bir problemde, gradasyona uygun olmayan boyutta agrega kullanılmasıdır. Gradasyona

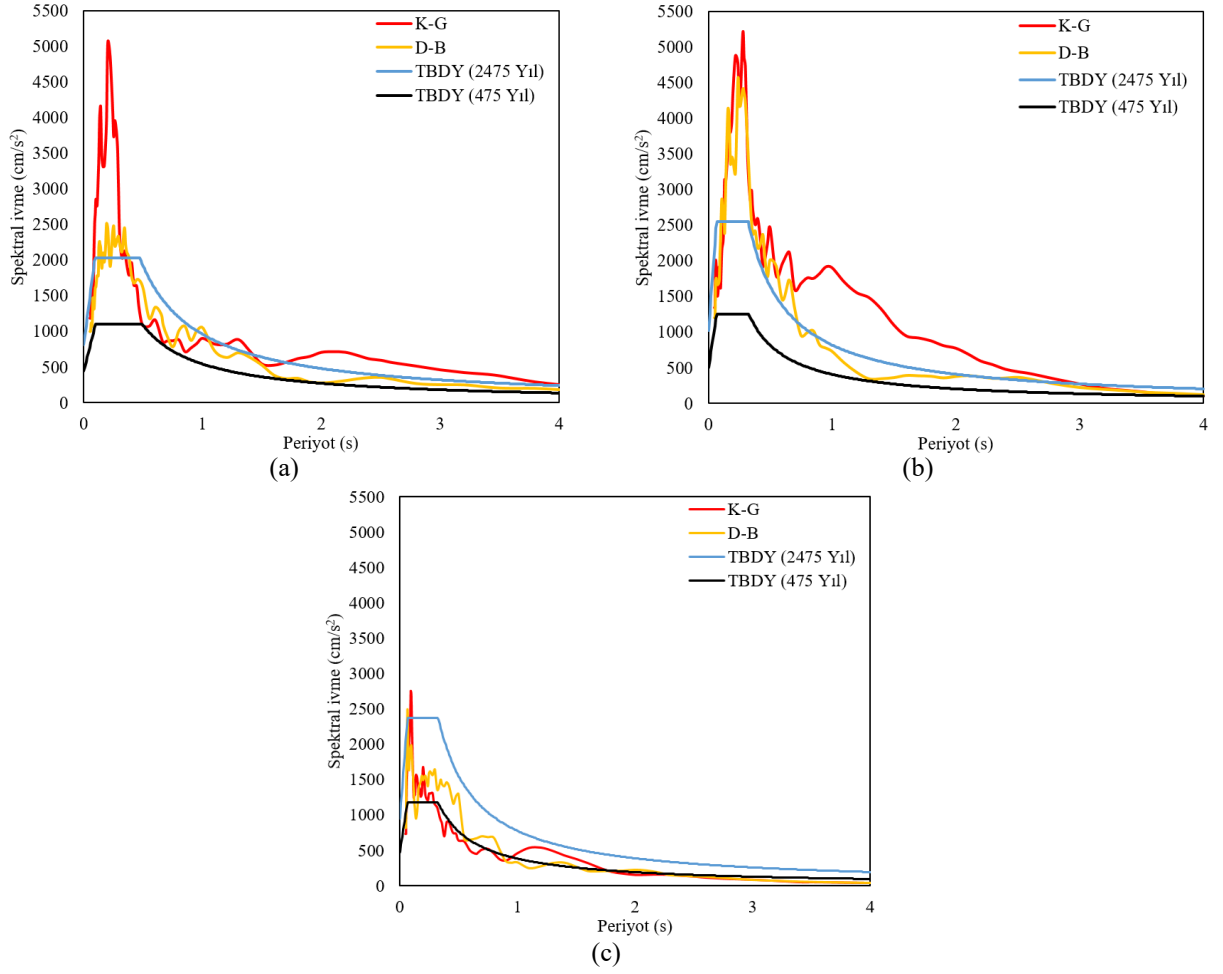
uygun olmayan büyük çaplı agrega kullanmak beton içinde çimento miktarını azaltmaktadır. Dolayısıyla betonda agregaları bir arada tutmak için yeterli miktarda bağlayıcı bulunmamakta ve beton dağılabilmektedir [15]. Ancak, Hatay bölgesinde özellikle eski yapılarda kullanılan betonların elle dökülmüş olduğu, yuvarlak şekilli ve dane çapı büyük agrega kullanıldığı görülmüştür (Şekil 4). Bu durum beton içindeki agregaların çimento hamuru ile aderansının zayıflamasına ve betonun parçalanmasına neden olmuştur.

Betonarme yapılarda malzeme kaynaklı diğer sorunların düz yüzeyli donatı kullanımı ve donatıların korozyona uğraması olduğu gözlemlenmiştir. Düz yüzeyli donatıların beton ile aderansı nervürlü donatılara göre oldukça zayıf olmakta ve bu durumda donatılar betondan kolaylıkla sıyrılabilmektedirler. Şekil 5-6'da sırasıyla düz yüzeyli donatı kullanımı ve bu tür donatıların betondan sıyrılmaları verilmektedir.

Betonarme yapılarda yetersiz paspayı ve düşük kalitede beton kullanımı sonucu donatılarda korozyon problemi ortaya çıkmaktadır. Korozyon problemi beton ile donatı arasındaki aderansı zayıflatmakta ve donatının etkinliğini azaltmaktadır. Bu durum yapının dayanım ve rijitliğini azaltmaya neden olduğu için taşıyıcı sistemde kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumları açısından sorun oluşturmaktadır [16]. Bölgede incelenen yapılarda karşılaşılan korozyon problemleri Şekil 7'de verilmiştir.

3.2.2 Yapısal hasarlar

Bitişik nizam inşa edilecek betonarme yapılarda dikkate alınacak en önemli kriterlerin başında deprem derzi mesafesi gelmektedir. Derz mesafesi, bitişik nizamda farklı periyotlara sahip iki farklı betonarme yapının deprem etkisinde yapacakları salınım hareketi sonucunda birbirlerine yapısal hasar vermemeleri için oldukça önemlidir. Bu tür yapılarda en tehlikeli durum bir binanın döşeme hizasının diğer binanın kolon elemanı üzerine denk gelmesidir. Bu durumda kolonlarda yüksek kesme kuvveti oluşmakta ve bina taşıyıcı sistemi önemli derecede hasar almaktadır.



Şekil 3. (a) 3126 (b) 3129 (c) 3125 No'lu istasyondaki ivme kayıtlarından elde edilen yatay tepki spektrumlarının TBDY-2018 [11] yatay elastik tasarım ivme spektrumları ile karşılaştırılması



Şekil 4. Maksimum agrega boyutu büyük ve düşük dayanımlı beton



Şekil 5. Düz yüzeyli (nervürlü) donatı kullanımı



Şekil 6. Nervürsüz donatı kullanılan yapılarda deprem sırasında donatının betondan sıyrılması



Şekil 7. Korozyona uğramış donatı

TBDY-2018 [11] yönetmeliğinde bırakılacak minimum derz boşluğunun, 6 m yüksekliğe kadar en az 30 mm olması ve bu değere 6 m'den sonra her 3 m'lik yükseklik için en az 10 mm eklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Ancak, Hatay bölgesinde yapılan incelemelerde bu kurallara uymayan ve yıkılan binaların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8).

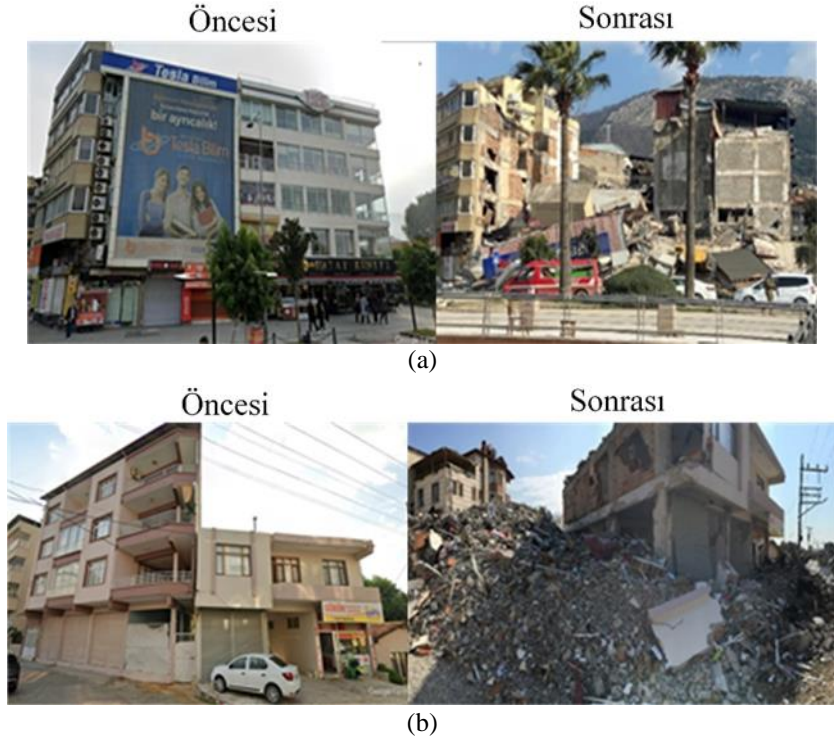
Sismik yüklerin bir yapıya etkisi sadece depremin davranışına bağlı olmayıp yapının özelliklerine de bağlıdır. Yapıda mevcut olan düzensizlikler deprem altındaki performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu düzensizlikler içinde yapısal hasarlara yol açarlardan biri de yumuşak kat düzensizliğidir. Yumuşak kat yapısal düzensizliği, komşu katlar arasındaki ani rijitlik farklarından kaynaklanan bir tür düşey yapısal düzensizliktir [17]. Bir katın rijitliği, üst katın rijitliğinden önemli miktarda düşük olduğunda, yanal yer değiştirmenin ve buna bağlı plastik deformasyonların büyük bir kısmı bu katta yoğunlaşır. Buna bağlı olarak yumuşak kattaki tüm kolonların her iki ucunda da plastik mafsallı oluşumu, bu nedenle yapısal stabilitenin bozulması ve kısmi/toptan göçme oluşabilmektedir. Yumuşak kattaki düşey taşıyıcı elemanlar ciddi şekilde hasar görürken, diğer yapı elemanlarının çoğu hasarsız kalabilmektedir [18]. Geçmiş depremler sonrası gözlemler de göstermektedir ki yumuşak katın oluşumuna sebep olan

ana unsur tuğla dolgu duvarların belirli bir katta bulunmamasıdır. Yapısal taşıyıcı eleman olarak değerlendirilmeyen ve oluşturduğu düşey yük dışında tasarım aşamasında dikkate alınmayan tuğla dolgu duvarların yanal rijitlik ve dayanımını ciddi oranda etkileyebilmektedirler. Dolayısıyla tuğla duvarların tüm katlarda mevcut iken bir katta eksik olması önemli bir rijitlik düzensizliği oluşturabilmektedir.

Deprem bölgesindeki birçok yapıda zemin katların ticari amaçla kullanılmasından dolayı kolonlar arasında dolgu duvar bulunmamaktadır. Üst katları konut olarak kullanıldığı için dolgu duvarla çevrili olan bu yapılarda rijitlik farkından dolayı yumuşak kat düzensizliğinin olduğu belirlenmiştir. Deprem bölgesinde bu tür düzensizlikten dolayı meydana gelen kısmi/toptan göçmeler Şekil 9-10'da gösterilmiştir

3.2.3 Taşıyıcı elemanlarda oluşan hasarlar

Betonarme yapıların deprem etkisinde performansına en çok zarar veren durumların başında kolon ve kirişlerde en büyük taleplerin ortaya çıktığı uç bölgelerde (sarılma bölgesi), ve bu elemanların birleşim bölgelerinde oluşan hasarlar gelmektedir. Bu tür bölgelerde, yeterli tasarım detayları da mevcut değilse, ortaya çıkan hasarlarda elemanların dayanımları hızlı bir şekilde azalmakta ve yapı



Şekil 8. Bitişik nizam iki yapının deprem öncesi ve sonrası görünüşleri a) Hatay-Antakya, b) Hatay-Samandağ



Şekil 9. Yumuşak kat düzensizliğinden dolayı toptan göçme meydana gelen yapılar. a) Hatay-Antakya, b) Hatay-Samandağ

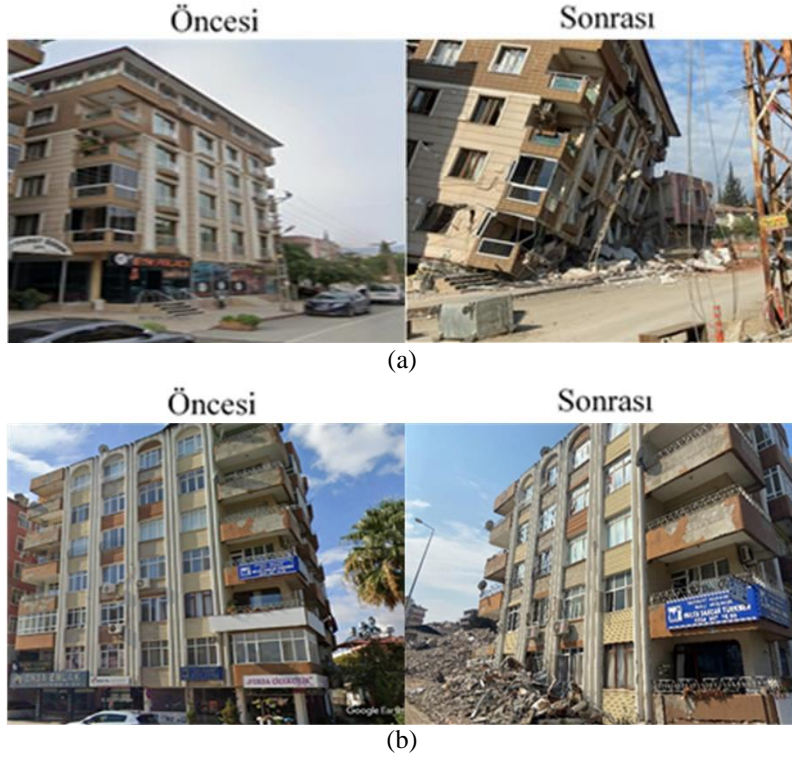
göçme durumuna gelebilmektedir [14]. Deprem bölgesinde kolon-kiriş birleşim bölgelerinde etriye kullanılmayan birçok yapı tespit edilmiştir (Şekil 11).

Şekil 12’de Hatay-Samandağ’da bulunan bir yapının kolon-kiriş birleşim bölgesi ve kolonun alt ucu gösterilmiştir. Sarılma bölgesi olmasına rağmen yeterli sayıda etriye kullanılmadığı ve etriyenin kancalarının 135° kıvrımlı olmadığı görülmektedir. Bu tür yapılarda etriyeler, çekirdek betonu ile yeterli aderansı sağlayamadığı için açılmaktadır. Bu durum boyuna donatının burkulmasına ve çekirdek betonun ezilmesine neden olmaktadır.

Şekil 13’de Hatay-Samandağ bölgesindeki bir yapı gösterilmiştir. Şekil 13a’da kolon üst sarılma bölgesinde etriye sıklaştırması yapılmış olması gerekirken hiç etriye bulunmadığı görülmektedir. Aynı binanın başka kolonlarında etriye kullanılmadığı için oluşan kesme çatlakları gözlenmektedir (Şekil 13b).

Betonarme yapılarda hasara yol açan bir diğer problemde kısa kolonlardır. Kısa kolonlar, taşıyıcı sistem nedeni ile veya dolgu duvarlarında kolonlar arasında bırakılan boşluklar nedeni ile oluşabilmektedirler. Böyle tasarlanan yapılarda deprem yönetmeliğine uygun olarak kısa kolonla ilgili kapasite tasarım ilkelerine özenli bir şekilde uyulması gerekir [19]. Zira kolon ne kadar kısa ise deprem nedeniyle oluşabilecek kesme talepleri o kadar büyük olacaktır. Bu durumda kapasite tasarım ilkelerine göre uygun tasarlanmayan kolonlar gevrek bir davranış sergileyerek kırılacaklardır. Hatay bölgesinde yapılan gözlemlerde depremden sonra binaların yıkılmasına neden olan bu tür yapısal elemanlar tespit edilmiştir (Şekil 14).

Betonarme yapılarda mimari zorunluluklar nedeniyle kısa kirişler kullanılabilmektedir. Ancak özellikle perde duvara bağlanan kısa kirişlerde kesit boyutlarının yetersizliğinden dolayı kesme kırılmaları oluşmaktadır.



Şekil 10. Yumuşak kat düzensizliğinden dolayı kısmi göçme meydana gelen yapılar, Hatay-Antakya



Şekil 11. Kolon ve kiriş uçlarında ve birleşim bölgelerinde oluşan hasarlar



Şekil 12. Kolon elemanlarda yetersiz sayıda ve yanlış etriye kullanımı sonucu oluşan hasarlar



Şekil 13. a) Kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye kullanılmayan bina. b) Binanın diğer kolonlarında oluşan kesme çatlakları

Öztürk [20], yaptığı çalışmada kısa kirişlerin kesme kapasitesini arttırmak için çapraz kesme donatıları kullanmıştır. Çalışma kapsamında 19 adet betonarme kısa kirişi deneysel olarak test etmiş, 76 adet betonarme kısa kirişin sonlu elemanlar modelini oluşturarak doğrusal olmayan analizlerini yapmıştır. Çalışma sonucunda çapraz kesme donatılarının kesme çatlaklarını oluşmasını engellemediğini ancak çatlakların büyümesini büyük oranda azalttığını tespit etmiştir. Deprem bölgesinde özellikle yeni binalarda ve perde duvarlar arasında kısa kiriş kullanıldığı ve bu elemanların kesme hasarı aldıkları görülmüştür (Şekil 15).

3.2.4 Güçlendirilmiş binaların davranışı

Hatay-Defne'de bulunan 2008 yılında ilave perde duvar ve karbon lifli polimer ile güçlendirilen Antakya Kooperatif Evleri Sitesi A-3 Nolu yapı Şekil 16'da gösterilmiştir. Bu yapıda belirli duvarlar üzerinde çapraz karbon lifli polimer uygulaması [21-23] ve bazı açıklıklarda ise dolgu duvar yerine perde duvar teşkil edilerek bir sistem iyileştirmesi yoluna gidilmiştir. Dolgu duvar üzerindeki çapraz lifli polimer uygulamasını yapının dayanım ve sünekliğine

olumlu etki yaparken rijitliğini arttıramamaktadır. Gereкли olan rijitlik artışının perde duvarlar tarafından sağlanması amaçlanmıştır [24]. Ayrıca belirli elemanlarda karbon lifli polimerlerle kolon sargılaması yapılmıştır. Güçlendirilen yapının deprem etkisinde yıkılmamış olduğu ve Şekil 16'da gösterilen bazı hasarları aldığı tespit edilmiştir.

3.2.5 Taşıyıcı olmayan elemanlarda oluşan hasarlar

Depremden sonra en yaygın yapısal olmayan eleman hasarı dolgu duvar elemanlarda oluşan hasarlardır. Dolgu duvar hasarları Antakya ve Samandağ il merkezlerinde yaygın olarak gözlemlenen hasar türlerindedir. Dolgu duvarlar, düzlem dışı stabilite bozulmadığı ve betonarme sisteminden ayrışmadığı sürece belirli bir noktaya kadar tersinir yükler altında yapı rijitliğine ve dayanımına katkı sağlamaktadırlar. Ancak bunun ötesinde, böylesi bir depremde ortaya çıkan yüklemeler altında oluşan dolgu duvar hasarları kısa kolon benzeri bir duruma sebebiyet vererek kolonlarda ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ilave kesme talepleri ortaya çıkartabilirler. Bölgede gözlemlenen dolgu duvar hasar örnekleri Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 14. Kısa kolonlarda oluşan hasarlar



Şekil 15. Kısa kirişlerde oluşan hasarlar



Şekil 16. Güçlendirilmiş bir yapının depremden sonraki durumu ve oluşan hasarlar



Şekil 17. Dolgu duvarlarda oluşan hasarlar

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, 2023 yılının Şubat ayında Kahramanmaraş ve Hatay depremlerinden sonra Hatay'ın Antakya ve Samandağ ilçelerinde hasar gören betonarme yapılarda yazarlar tarafından bölgede yapılan incelemeler sonucu gözlenen hasarların nedenleri ve çözümleri tartışılmıştır. Bu nedenle öncelikle meydana gelen depremler ve incelenen bölgenin jeolojik durumu hakkında bilgiler verilmiş daha sonra oluşan en büyük depremin Hatay'ın Antakya ilçesindeki ivme değerleri incelenmiştir. Deprem hakkındaki bilgiler özetlendikten sonra bölgede yapılan incelemelerde gözlemlenen betonarme yapı hasarları detaylı olarak ele alınmıştır. Buna ilaveten depremden önce güçlendirilmiş bir bina incelenmiş ve binanın depremlerden sonraki durumu gösterilmiştir. Bölgede yerinde yapılan gözlemsel incelemeler sonucunda aşağıdaki durumlar tespit edilmiştir.

- Bölgede incelenen yapılarda betonlarda kullanılan agregaların yuvarlak yüzeyli ve maksimum dane çapının oldukça büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda çimento hamuru ve agrega arasındaki aderans zayıflamakta ve düşük dayanımlı beton oluşmaktadır. Düşük dayanıma sahip betonarme elemanlarda oluşan bir diğer sorun, yönetmeliklere uygun donatı kullanılsa da beton ile donatı arası yeterli oranda kenetlenme olmamasından kaynaklı olarak donatılarda sıyrılmaya meydana gelmesidir.
- Beton kalitesinin düşük olduğu yapıların genellikle 2000 yılı öncesi inşa edilmiş olduğu belirlenmiştir. Türkiye'de hazır beton kullanımının yaygınlaşmasının bu probleme bir çözüm olduğu söylenebilir.
- Özellikle 2000 yılı öncesi yapılmış binaların yapısal elemanlarında yalnızca düz yüzeyli donatı veya nervürlü donatı ile beraber düz yüzeyli donatı kullanıldığı görülmüştür. Bu durumda donatılar özellikle korozyona da uğraması ile beraber beton ile aderansını kaybetmekte ve kolaylıkla sıyrılabilmektedir.
- Betonarme yapılarda özellikle kolon elemanların sarılma bölgelerinde ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde yeterince etriye kullanılmadığı veya hiç etriye bulunmadığı görülmüştür. Bu durum kolonlarda kesmeden dolayı büyük hasarların oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca bölgedeki binalarda TBDY-2018'de

verilen etriye ve çiroz detaylarına uyulmadığı tespit edilmiştir. Bu tür durumlarda çekirdek betonu ile donatı arasındaki aderans azalmakta ve çekirdek betonun ezilmesi ile sonuçlanmaktadır.

- Bölgedeki binaların büyük çoğunluğunda dolgu duvar hasarı meydana gelmiştir.
- Bölgede kısmi dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız ticari amaçla kullanılan zemin katların bazılarında yumuşak kat düzensizliği görülmüş bu düzensizlik sonucu yapıların birçoğu ağır hasar almış veya yıkılmıştır.
- Bazı yapılarda yeterli düzeyde deprem derzi bulunmadığı için hasarlar oluşmuştur.
- Bölgedeki bazı yapılarda kısa kolon ve kısa kirişlerden kaynaklı hasarlar gözlemlenmiştir.

Bölge jeolojik faktörler bakımından depreme karşı oldukça hassas bir bölgede bulunmaktadır. Özellikle 2000 yılı öncesinde yapılan binalarda deprem etkisinin büyük ölçüde ihmal edildiği, 2000 yılı sonrasında yapılan binalarda da tasarımda ve özellikle uygulamalarda büyük hataların yapıldığı görülmüştür. Fay hattı üzerinde bulunan Hatay bölgesinde bundan sonra inşa edilecek yapılarda depremsellik ögesine daha çok önem verilmelidir. Bölgede detaylı mikrobölgeleme çalışması yapılmalı ve sıvılaşma riski olan bölgeler ile yumuşak zeminler belirlenerek zemin haritaları çıkarılmalıdır. Bunun sonucunda zemin iyileştirme çalışmalarına öncelik verilmelidir. Hazır beton firmalarının ve donatı üretimi yapan şirketlerin düzenli olarak denetlemesi yapılarak söz konusu malzemelerin yönetmeliklere uygun olarak üretimi sağlanmalıdır. Bölgede hasar alan binaların performans değerlendirilmesi yapılarak, bina durumuna göre güçlendirilmeli veya yıkılıp yeniden inşa edilmelidir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 17

Kaynaklar

- [1] T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/map>, Accessed 15 March 2023.

- [2] Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE), Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM). <http://udim.koeri.boun.edu.tr>, Accessed 15 March 2023.
- [3] Ö. Emre, T. Y. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, Ş. Olgun ve F. Şaroğlu, Türkiye Diri Fay Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayın Serisi-30, Ankara, 2013.
- [4] TÜİK- Coğrafi İstatistik Portalı. <https://cip.tuik.gov.tr/>, Accessed 15 March 2023.
- [5] Ö. B. Engin, Hatay Bölgesi için Deprem Tehlike Analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Türkiye, 2010.
- [6] T. N. Ovalı, Antakya Bölgesinin Sismik Yer Hareketinin Hasar Potansiyeli. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.
- [7] M. O. Özkoçak, Hatay Horst ve Graben Yapısının Amanos Dağları Altın Yatak ve Zuhurları. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 17 (1), 52-59, 1993.
- [8] U. Tarı, O. Tüysüz, Ş. Can Genç, C. İmren, B.A.B. Blackwell, N. Lom, Ö. Tekeşin, S. Üsküplü, L. Erel, S. Altıok ve M. Beyhan, The geology and morphology of the Antakya Graben between the Amik Triple Junction and the Cyprus Arc. Geodinamica Acta, 26 (1-2), 27-55, 2013. <https://doi.org/10.1080/09853111.2013.858962>
- [9] AFAD TADAS, Türkiye İvme Veritabanı Ve Analiz Sistemi, Deprem Dairesi Başkanlığı. <https://tadas.afad.gov.tr/map>, Accessed 15 March 2023.
- [10] E. Özşahin, Antakya'da (Hatay) Yer Seçiminin jeomorfolojik Özellikler ve Doğal Risk Açısından Değerlendirilmesi. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 13 (23), 1-16, 2010.
- [11] TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2018.
- [12] B. Duman, O. Tunaboyu ve Ö. Aşar, Düşük Dayanımlı Betonun Elastisite Modülünün Belirlenmesi ve RYTEİE ile Yapılan Risk Değerlendirme Etkisi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (1), 253-264, 2017. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.300617>
- [13] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2007.
- [14] R. A. Oyguc, 24 Ocak 2020 Elazığ Depreminde Hasar Gören Yapıların Sismik Davranışlarının İncelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11 (1), 140-155, 2022. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1000615>
- [15] N. Çağlar, B. Bayhan, E. Avcı, S. Kocakaplan, S. Özen, E. Yıldırım ve G. B. Sakcalı, Kahramanmaraş Depremleri Pazarcık [Mw=7.7] ve Elbistan [Mw=7.6], İnceleme ve Değerlendirme Raporu. Bursa Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bursa, Türkiye, Şubat 2023.
- [16] A. Salah-Eldin, H. M. Mohamed ve B. Benmokrane, Structural Performance of High-Strength-Concrete Columns Reinforced with GFRP Bars and Ties Subjected to Eccentric Loads. Engineering Structures, 185, 286-300, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.143>
- [17] A. Köroğlu, Rehabilitation of Building Structures with Soft Story Irregularity via Optimal Viscous Damper Distribution. Master Thesis, Hacettepe University, Ankara, 2022.
- [18] A. Noorifard, M. R. Tabeshpour and F. M. Saradj, New approximate method to identify soft story caused by infill walls. Structures, 24, 922-939, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruct.2020.01.050>
- [19] A. Doğançün, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. Birsen Yayınevi, İstanbul, 2021.
- [20] H. Öztürk, Betonarme Kısa Kirişlerde Kesme Dayanımının Çapraz Kesme Donatıları ile İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [21] E. Akın, E. Canbay, B. Binici ve G. Özcebe, Testing and analysis of infilled reinforced concrete frames strengthened with CFRP reinforcement. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 30 (19), 1605-1620, 2011. <https://doi.org/10.1177/0731684411424631>
- [22] E. Akın, G. Özcebe, E. Canbay ve B. Binici, Numerical Study on CFRP Strengthening of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infill Walls. Journal of Composites for Construction, 18 (2), 2013. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000426](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000426)
- [23] E. Akın, Effects of various parameters on CFRP strengthening of infilled RC frames. Journal of Performance of Constructed Facilities, 30 (1), 2014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.19435509.0000683](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.19435509.0000683).
- [24] M. T. Tan, Seismic Strengthening of A Mid-Rise Reinforced Concrete Frame Using Cfrps: An Application From Real Life. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2009.





Distributed coverage control with mobile robots: A potential game approach

Mobil robotlar ile dağıtık kapsama kontrolü: Bir potansiyel oyun yaklaşımı

Samet Güler^{1,*} 

¹ Abdullah Gül Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38080, Kayseri Türkiye

Abstract

The use of mobile robots in industrial applications has led to a demand for autonomous multi-robot systems with robust and distributed algorithms. A critical objective in such systems is coverage control, where a team of mobile robots need to respond to spatiotemporal events in a bounded region. Here, we address a specific coverage problem, where a group of mobile robots are tasked with responding to events by covering specific locations on two sides of a linear workstation. We formulate the problem as a game played by the mobile robots with well-designed player strategies, and we demonstrate that the resulting framework is a potential game based on equally shared utilities among the robots. The proposed framework is distributed and decentralized, allowing for anonymous identities and constrained sensing capabilities in the robots. A set of simulation studies verify our approach.

Keywords: Coverage control, Multi-robot systems, Learning algorithms

1 Introduction

The integration of mobile robots in industrial environments has the potential to greatly improve the efficiency and productivity of many industrial processes. In an industrial workspace, the use of mobile robots along with robot manipulators can enhance the flexibility, robustness, and resiliency of routine operations [1-3]. Particularly, mobile manipulators can combine the advantages of ground robots and manipulators and extend the configuration space of manipulators by moving their bases in a Cartesian environment. This additional freedom of motion is being explored across many applications. In some Industry 4.0 settings, a mobile manipulator is usually tasked with picking objects from designated locations and placing them at a given target location autonomously. Additionally, mobile manipulators can be used for monitoring a predetermined workspace, allowing remote operators to detect and respond to events in real time. Mobile manipulators have demonstrated advantages in terms of precision in attaining these tasks compared to human workers [3].

An important task of service robots in industrial environments is to cover a desired workspace with some performance guarantees. Coverage control involves the spatial allocation of a set of robots in a workspace to achieve some desired level of coverage. Many distributed coverage control schemes have been derived for multi-robot systems;

Öz

Endüstriyel uygulamalarda mobil robotların kullanımı, gürbüz ve dağıtık algoritma içeren otonom çoklu-robot sistemlerine bir gereksinim oluşturmuştur. Bir robot takımının sınırlı bir alanda uzaysal-zamansal olaylara cevap vermesi anlamına gelen kapsama kontrolü bu tür sistemlerde kritik bir hedefdir. Bu çalışmada, bir grup mobil robotun doğrusal bir iş istasyonunun iki tarafında belirli lokasyonları kapsamakla görevli olduğu özel bir kapsama problemini ele alıyoruz. Problemi iyi kurgulanmış oyuncu stratejileri ile mobil robotlar arasında oynanan bir oyun olarak formalize ediyor ve ortaya çıkan yapının eşit paylaşılan fayda temelli bir potansiyel oyun olduğunu gösteriyoruz. Sunulan yapı, robotlarda anonim kimlikler ve kısıtlı algılama yeteneklerine izin veren dağıtık ve merkezi olmayan bir yapıdır. Bir grup simülasyon çalışması yaklaşımımızı doğrulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Kapsama kontrolü, Çoklu-robot sistemleri, Öğrenme algoritmaları.

see for instance [4-6] and the references therein. If the workspace consists of dynamic entities, such as varying event locations and dynamic obstacles, the robots need to respond to events reactively, which require a well-designed perception and decision mechanism on the robots. In such cases distributed and decentralized algorithms possess critical benefits over the centralized approaches [4], [7,8]. Unlike centralized approaches, decentralized approaches do not require all-to-all robot communication or complete sensing mechanism, resulting in a stable real-time implementation and seamless integration with fewer sensing units. Therefore, distributed and decentralized algorithms can be utilized to achieve coverage control in dynamic settings efficiently.

Game theory provides a powerful framework for addressing coverage control problems in a distributed and decentralized fashion. Game theoretical models allow us to formally analyze the interactions between robots, and to design control algorithms that can balance conflicting objectives such as maximizing coverage while minimizing the number of robots used [7-9]. Recently, there has been significant interest in using game theoretical approaches to address coverage control problems in service robots. One major challenge in applying game theoretical approaches to coverage control in service robots is the need to model the robots' behavior in a way that reflects their physical

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: samet.guler@agu.edu.tr (S. Güler)

Geliş / Received: 05.05.2023 Kabul / Accepted: 17.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1293191

capabilities and limitations. Service robots have a wide range of capabilities, ranging from simple robotic arms that perform repetitive tasks to highly sophisticated autonomous systems that can navigate complex environments. To design effective coverage control algorithms for these systems, it is important to accurately model their capabilities and limitations, including their sensing, communication, and mobility capabilities [4-9]. Another important challenge in game theoretical coverage control for service robots is to design algorithms that can effectively handle dynamic environments. To be effective, coverage control algorithms must be able to adapt to these changing environments, considering the changing distribution of tasks and the changing availability of resources [7,8]. Additionally, it is important to consider the scalability of coverage control algorithms, as they will often be applied to large-scale systems with many robots operating in parallel.

Potential game refers to a type of game where the collective behavior of the players can be related to a potential function which is aligned with the unilateral deviation of a player's utility when the other players maintain their actions [9]. In a multi-agent system, since the potential function can be associated with the collective objective of the system, each agent's utility can be designed in such a way that favors increase of the potential, resulting in the emergence of the desired collective behavior [10]. Potential games have been successfully applied to several engineering problems, including unmanned aerial vehicle (UAV) search-and-rescue [10], power control in wireless networks [11], and distributed optimization problems [12]. Recently, state-based potential games have introduced an additional degree-of-freedom in the design process, thus enabling us to solve challenging engineering constraints at the design stage [13]. For instance, state-based potential games are designed for 2D area coverage in [14-17], where the trade-off between the energy consumption of the agents and the covered area is formulated with a game state. Several modifications to the original coverage algorithms aim to improve the convergence rate in unknown environments [18].

Many learning algorithms have been introduced to complete the design process of multi-player potential games, such as the binary log-linear learning (BLLL) algorithm and the better reply processes [6], [13]. Remarkably, some learning algorithms ensure the attainment of the maxima of the potential function in the steady state, i.e., as time approaches infinity [19]. Although the short-term behavior of these algorithms lacks theoretical justifications, this asymptotic behavior can be well-applied to solve many engineering problems. It is worth emphasizing that most learning algorithms allow designing of player strategies in a distributed and decentralized fashion, enabling real-world implementations.

We consider the coverage control of service robots (e.g., mobile manipulators) in a typical industrial application scenario. The robots are tasked with responding to events which can occur on a workstation sporadically, by arriving at certain locations on both sides of the event location. In particular, the workstation consists of a linear track with finite event locations. This scenario is motivated by a variety

of application examples, ranging from the object loading/unloading task by collaborating mobile manipulators and drones to the task of event monitoring by mobile ground robots. We tackle the problem by formulating it as a game played by mobile robots, where the utilities are determined based on the achievement of the responses to the events. We show that the designed game constitutes a potential game, where the potential function corresponds to the total success of the robots and is aligned with the individual robot utilities. Subsequently, we design a BLLL algorithm among the robots. Finally, we discuss possible practical constraints that can appear in real-world application of the proposed algorithm and modifications to the algorithm to solve these challenges. Several simulation results demonstrate the effectiveness of the approach and the effect of using different parameter values on the performance.

The paper is organized as follows. In Section 2, we provide the system formulation and the method, providing a brief background about game theory and notations. In Section 3, we give the simulation results. Finally, Section 4 is on conclusions.

2 Material and method

In this section, we present the problem formulation and the solution method. We start by defining a generic multi-robot system (MRS) considered in abstract terms. Then, we give the main objective of the paper. Finally, the game theory-based solution method is introduced.

2.1 System modeling

We consider a workspace W , a subset of the two-dimensional (2D) Cartesian plane \mathbb{R}^2 , with a fixed global frame Σ_G (Figure 1). Assume that there exist three linear parallel tracks with finite lengths on the workspace W , named W_C, W_L , and W_R , where the subscripts C, L, R denote the center, the left, and the right tracks. Each track forms a line segment lying along the Σ_G^y -axis of the frame Σ_G at a certain location (Figure 1). We denote the Σ_G^x -axis and the Σ_G^y -axis by the lateral axis and the longitudinal axis, respectively.

On the center workspace W_C , a set of events may occur at certain locations which are located on a set of finite number of waypoints $\{w_i^C\}, i \in \{1, \dots, K\}, K \geq 3$, where $w_i^C = [w_{i,x}^C, w_{i,y}^C]^T \in \mathbb{R}^2$. For instance, in an industrial application scenario, these events can include workstations requiring loading/unloading operations, or human operators waiting for mobile robot service. The events are detected by a set of sensors, such as cameras and LIDARs, which are mounted underneath a set of vertical-take-off-and-landing (VTOL) drones. Therefore, we consider N number of drones $\mathcal{D}_i, i \in \{1, \dots, N\}, 1 < N < K$. In essence, a VTOL drone agent can move linearly in and rotate around the three Cartesian axes (x, y, z) in space, which results in six degree-of-freedom (6-DOF) motion model. For convenience, we assume that the low-level controller of a drone stabilizes its altitude, x-axis motion, and the roll, pitch, and yaw angles. Hence, a drone can move linearly on the waypoints $w_i^C, i \in \{1, \dots, K\}$ along the workspace W_C at a constant altitude. We assume that the drones can move fast and precisely between

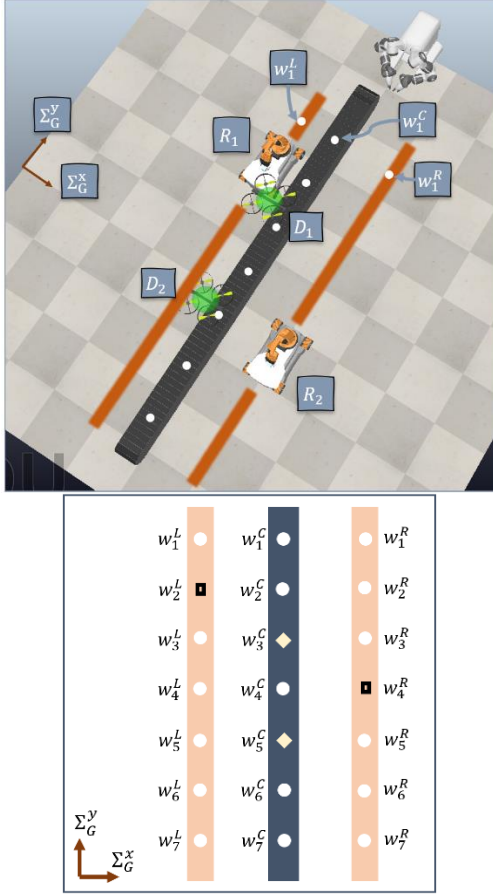


Figure 1. (Top) A sample workplace environment for $N = 2, K = 7$. The drones represent the events that occur on the conveyor belt by moving along the indicated axis on the belt. The UGVs aim to spend most of their operation time around these locations by moving on the orange-colored tracks on both sides of the belt. The waypoints w_1^C, w_1^L, w_1^R are shown as example. Drone \mathcal{D}_2 is covered by UGV R_2 , while drone \mathcal{D}_1 is not covered by any UGV. (Bottom) The 2D representation of the workspace given. White dots denote the waypoints, black rectangles denote UGVs, and the yellow squares denote the drones.

the waypoints, and their motion dynamics can be ignored, i.e., the presence of a drone at a waypoint w_i^C at a time step t indicates that an event occurred at w_i at that time step. Denote the position of drone \mathcal{D}_i on the longitudinal axis by $y_i^D, i \in \{1, \dots, N\}$.

A set of unmanned ground vehicles (UGVs) $R_i, i = \{1, \dots, N\}$, aim to serve the events that occur on the workspace W_C by moving along the workspaces W_L, W_R . For convenience, we impose that $\lceil N/2 \rceil$ number of UGVs lie on the track W_L , and the rest of the UGVs lie on the track W_R , where $\lceil \cdot \rceil$ is the ceiling function. Denote the sets which contain the UGVs on the track W_L and the UGVs on the track W_R by \mathcal{S}_L and \mathcal{S}_R , respectively. On the workspaces W_L, W_R , define the sets of the waypoints $\{w_k^L\}$ and $\{w_k^R\}, k \in \{1, \dots, K\}$, where $w_k^L = [w_{k,x}^L, w_{k,y}^L]^T \in \mathbb{R}^2$ and $w_k^R =$

$[w_{k,x}^R, w_{k,y}^R]^T \in \mathbb{R}^2$. The waypoints have the property that $w_{k,y}^C = w_{k,y}^L = w_{k,y}^R, k \in \{1, \dots, K\}$, i.e., the waypoints w_k^C, w_k^L , and w_k^R reside on the same lateral axis for each $k \in \{1, \dots, K\}$ (Figure 1). We say that at any time step t , UGV R_i engages with (or serves) drone \mathcal{D}_j if drone \mathcal{D}_j is at the waypoint w_k^C , and UGV R_i is at one of the waypoints w_k^L, w_k^R . Evidently, a drone (or event) can be covered by at most two UGVs, one on W_L and one on W_R .

We denote by y^i the y-axis position of $R_i, i = \{1, \dots, N\}$. We assume that the UGVs can move on their longitudinal axes precisely, i.e., their low-level control mechanisms always keep them on the linear tracks W_L, W_R by controlling their lateral motions and heading angles. Define $t \in \{0, 1, \dots, T_f\}$ as the discrete time index, where T_f is the final time. We assume that the UGV motions on the longitudinal axes take place between two consecutive time steps. That is, if a UGV R_i starts moving from a waypoint at a time step t_0 , then it can reach its destination waypoint until the next time step $t_0 + 1$.

We assume that the UGVs and the drones are equipped with ultrawideband (UWB) sensors for distance measurement and inter-robot communication. For localization purposes, each follower UGV is also equipped with other sensors, such as monocular/depth cameras. In this work, assuming that the UGV localization is achieved by another control layer with sufficient precision, we focus on the task allocation of the UGVs in the following part.

2.2 Objective

The main goal is to design a path planning algorithm for the UGV team so that they spend most of their operation time next to the drones' locations. This goal is relevant to several industrial applications; for instance, the UGVs can collaborate with other robot manipulators in achieving a common task at the event location, such as object loading/unloading operation. As an illustration, consider Figure 1-top, where two drones are hovering on top of detected events to broadcast event locations, and two UGVs are aiming to cover the drones by moving to the neighborhoods of the drones on both sides. Here, the term coverage is interpreted as moving the UGVs to the drones' locations laterally. Notably, the UGVs are restricted to move on the workspaces W_L, W_R along the longitudinal axis of the global frame Σ_G (the orange tracks in Figure 1).

It is desired that the drones $\mathcal{D}_i, i = \{1, \dots, N\}$, are served by the UGVs $R_j, j = \{1, \dots, N\}$, where the horizontal location of a UGV does not affect its efficiency, i.e., the UGVs $R_i \in \mathcal{S}_L$ and the UGVs $R_i \in \mathcal{S}_R$ can serve at the drone event with the same efficiency. However, if a drone is covered by a UGV from either the left track W_L or the right track W_R , the involvement of a second UGV with the same drone contributes to the total efficiency less than the reward gained by the involvement of the first UGV. Accordingly, define the utility $E_i(Y[t], Y^D)$ at time step t for drone \mathcal{D}_i , where $Y^D = [y_1^D, \dots, y_N^D]^T, Y = [y_1, \dots, y_N]^T$, with the following rules:

- i) $E_i(Y[t], Y^D) = 0$ if drone \mathcal{D}_i is not covered by any UGV,
- ii) $E_i(Y[t], Y^D) = p$ if drone \mathcal{D}_i is covered by two UGVs,

iii) $E_i(Y[t], Y^D) = 2p$ if drone \mathcal{D}_i is covered by one UGV.

Here, $p > 0$ denotes the reward gained by engagement of a UGV with a drone and can take any value.

Furthermore, UGV motions should be scheduled so that no two UGVs collide with each other, i.e., at any time step t it must be satisfied that $y_i[t] \neq y_j[t]$ for all $i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j$. Considering these requirements, the main goal is summarized as follows:

Objective 1: Given the MRS defined thus far, design a reactive path planning algorithm for each UGV $R_i, i \in \{1, \dots, N\}$, to solve the following optimization problem:

$$\begin{aligned} & \max_Y \sum_{i=1}^N E_i(Y, Y^D) \\ & \text{s.t. } y_i \neq y_j \text{ for all } i, j \in \{1, \dots, N\}, i \neq j. \end{aligned} \quad (1)$$

The objective function in Equation (1) aims to maximize the coverage of the drones such that each drone is desired to be covered by one UGV only while avoiding collisions among the UGVs. Thus, the maximum value corresponds to the case that N drones are covered by N distinct UGVs. An important property of this optimization objective is that the UGV identities remain anonymous, i.e., identities of the UGVs do not affect the objective function's value. Accordingly, the UGV allocations that lead to the maximum value in Equation (1) is not unique. We examine the optimality of the UGV allocations in Section 2.3 in detail.

2.3 The proposed approach

A common approach for addressing Objective 1 involves designing an optimization-based path planning framework among the UGVs. This method can be achieved by having the UGVs create an optimal path planning algorithm when the drones are at rest, and then adjusting the optimization process as the drones begin to move. This two-step process can be repeated continuously to accommodate ongoing operations. However, such methods usually require a centralized computational unit which acquires the real-time information from all agents, performs the computation, and broadcasts the solution to all agents. This structure would require a very large communication bandwidth and long-range sensory devices.

To address the challenges that can be faced with centralized approaches, we opt for a distributed and decentralized solution. Our approach is composed of two layers: Game design and learning algorithm design.

2.3.1 Game design

To overcome the deficiencies imposed by a centralized approach, we model Objective 1 as a game played by the UGVs. We design a game-based planning method because it allows the UGVs to strategically position themselves around the drones through a well-designed game model. As a distributed approach, the designed game has the potential to efficiently allocate the UGVs at event locations.

A hypothetical game consists of three components: players (who make decisions), actions (from a defined set of

actions), and utilities (rewards). In a repeated game, each player selects an action from its action set at each time step based on its utility evaluation. At the end of the selection procedure, each player receives a reward, referred to as utility. The repetition of this process over time constitutes a repeated game.

Potential games refer to a particular type of game where the strategies of each player correspond to a potential function that aligns with the changes in every player's strategy. The potential function represents the overall satisfaction of the players and can be used as a design guideline in several multi-agent system objectives, such as coverage and resource allocation. We start by defining these concepts formally.

Definition 1 (Game model): A game consists of a set of players (\mathcal{P}_i), a set of actions ($a_i \in \mathcal{A}_i$), and the utilities (U_i) where $i \in \{1, \dots, N\}$.

Let $a_{-i} = (a_1, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_N)$ denote the actions of all players except player i , where $a_i \in \mathcal{A}_i$, with \mathcal{A}_i denoting the action set of player $a_i, i \in \{1, \dots, N\}$. Also, let $(a_i, a_{-i}) \in \mathcal{A}$ represent the joint actions of the players, and $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \times \dots \times \mathcal{A}_N$ denote the set of joint actions. A fictitious potential game is defined as follows:

Definition 2 (Potential Game): Define $\phi(a): \mathcal{A} \rightarrow \mathfrak{R}$ as the potential function assigned for the action set $a = \{a_1, \dots, a_N\}$. An exact potential game satisfies the following condition:

$$\phi(a'_i, a_{-i}) - \phi(a''_i, a_{-i}) = U_i(a'_i, a_{-i}) - U_i(a''_i, a_{-i}) \quad (2)$$

for all $a'_i, a''_i \in \mathcal{A}_i, a'_i \neq a''_i$, and for all $i \in \{1, \dots, N\}$.

An important connection between potential games and coordination control of MRS is Nash equilibrium, which is defined as follows:

Definition 3 (Nash Equilibrium): Consider a game with players (\mathcal{P}_i), a set of actions ($a_i \in \mathcal{A}_i$), and the utilities (U_i) where $i \in \{1, \dots, N\}$. An action profile a^* is called a pure Nash equilibrium if

$$U_i(a_i^*, a_{-i}^*) = \max_{a_i \in \mathcal{A}_i} U_i(a_i, a_{-i}^*), \quad (3)$$

for all $i \in \{1, \dots, N\}$.

Potential games have notable advantages in formulating MRS objectives. The goal of MRS can be expressed through a potential function, allowing for player strategy profiles to be optimized for maximizing this function in a decentralized fashion. Therefore, we aim to design a potential game to solve Objective 1 in the following.

We design a game with the following elements:

- **Players:** The UGVs $R_i, i \in \{1, \dots, N\}$.
- **Actions:** The coordinates of the waypoints $w_k^L \in \mathfrak{R}^2, k \in \{1, \dots, K\}$, for the UGVs in the set \mathcal{S}_L , and the coordinates of the waypoints $w_k^R \in \mathfrak{R}^2, k \in \{1, \dots, K\}$, for the UGVs in the set \mathcal{S}_R .
- **Utilities:** In the following, the utility for a UGV R_i is designed to align with the ultimate objective, which is the maximization of the summation of $E_i(Y, Y^D)$.

We now design the utilities of the players. Denoting the difference in the longitudinal positions of UGV R_i and drone \mathcal{D}_j by $\zeta_{ij} = |y_i - y_j^D|$, $i, j \in \{1, \dots, N\}$, we propose to use the following utility for UGV R_i , in compliance with Objective 1:

$$U_i(a[t]) = \sum_{j=1}^N U_i^j(a[t]), \quad (4)$$

where $U_i^j(a[t])$ denotes the share of UGV R_i for engaging with drone \mathcal{D}_j for the action set $a[t]$ at time step t , defined by

$$U_i^j(a[t]) = \begin{cases} \bar{u}, & \text{if } \zeta_{ij}[t] = 0 \text{ and } \eta_j^i[t] = 0, \\ \frac{\bar{u}}{2}, & \text{if } \zeta_{ij}[t] = 0 \text{ and } \eta_j^i[t] = 1, \\ 0, & \text{if } \zeta_{ij}[t] \neq 0, \end{cases} \quad (5)$$

for $i, j \in \{1, \dots, N\}$. Here, $\eta_j^i[t] \in \{0, 1\}$, denotes whether drone \mathcal{D}_j is already covered by a UGV and is defined by:

$$\eta_j^i[t] = \begin{cases} 1, & \text{if } \exists k \in \{1, \dots, N\}, k \neq i, k \neq j, \zeta_{kj}[t] = 0 \\ 0, & \text{o. w.} \end{cases} \quad (6)$$

where $|S|$ denotes the cardinality of set S . Therefore, the utility $U_i^j(a[t])$ denotes the share of a UGV R_i from covering a target \mathcal{D}_j . More precisely, if a drone \mathcal{D}_j is not covered by a UGV except R_i , then R_i , which satisfies $\zeta_{ij} = 0$, will get the reward \bar{u} ; otherwise, UGV R_i 's reward will be divided by half to reduce the incentive to choosing a target which was already occupied by another UGV. The following proposition summarizes the properties of the game designed above.

Proposition 1: The game structure defined by the players R_i , the actions $a_i[t] \in \mathcal{A}_i$, and the utilities U_i as described in this section constitutes a potential game with the potential function:

$$\phi(a) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} \frac{\bar{u}}{i}, \quad (7)$$

where \mathcal{D}^* is the set of all drones covered by at least one UGV at time t , and $n_j \in \{1, 2\}$ is the number of the UGVs which engage with drone \mathcal{D}_j . Therefore, the designed game has at least one pure Nash equilibrium.

Proof: To see that Equation (2) holds with $\phi(a)$ of Equation (7) for all $a_i', a_i'' \in \mathcal{A}_i, i \in \{1, \dots, n\}$ and all $\mathcal{D}_j, j \in \{1, \dots, N\}$, consider a drone \mathcal{D}_j which is already covered by a UGV R_i whose utility is \bar{u} at time t . In this case, the potential due to drone \mathcal{D}_j is $\phi_j(a[t]) = \bar{u}$.

If a new UGV $R_k, k \neq i$, attempts to cover drone \mathcal{D}_j as well at the next time step $t + 1$, then there are two cases. The

first is that UGV R_k was not engaged with another drone at time t . In this case, since drone \mathcal{D}_j was already covered by UGV R_i , the shares of UGVs R_i and R_k would be $U_i(a[t + 1]) = U_k(a[t + 1]) = \frac{\bar{u}}{2}$, while the potential becomes $\phi(a[t + 1]) = \frac{3\bar{u}}{2}$. Thus,

$$\begin{aligned} \phi(a[t + 1]) - \phi(a[t]) &= \frac{\bar{u}}{2} \\ &= U_k(a[t + 1]) - U_k(a[t]). \end{aligned} \quad (8)$$

The second case is that UGV R_k was engaged with another drone \mathcal{D}_l at time t . In this case, there are two chances: (i) Drone \mathcal{D}_l was covered by another UGV and (ii) drone \mathcal{D}_l was not covered by another UGV. In the first case, $U_k(a[t + 1]) = U_k(a[t])$, and the potential does not change, $\phi(a[t + 1]) = \phi(a[t])$. In the second case, $U_k(a[t + 1]) - U_k(a[t]) = \frac{-\bar{u}}{2}$, and it can be shown to be equal to the change in the potential, i.e., $\phi(a[t + 1]) - \phi(a[t]) = \frac{-\bar{u}}{2}$. Thus, the conditions of the potential game are satisfied for the cases considered above. It can be shown for the other scenarios that the change in the utility U_k is always the same with the change in the potential ϕ . Therefore, the game is a potential game with the potential function in Equation (7). Since a potential game has at least one pure Nash equilibrium as stated in [4], the designed game has this property, as well. This completes the proof.

Remark 1: Since the UGV identity does not make any difference in the calculation of the target utilities U^j and the potential ϕ , the game allows anonymous allocation of the UGVs. The utility design in Equation (4) is called equally shared utility (ESU).

It is established in potential game theory that the actions that maximize the potential function lead to Nash equilibrium, and the players (UGVs) tend to choose those actions in steady state if suitable learning algorithms are used. In our problem setup, this means that the UGV team operate most of the time at equilibrium actions. The following result characterizes the Nash equilibria for the designed game.

Proposition 2: A pure Nash equilibrium maximizes the potential $\phi(a)$ and corresponds to a distinct allocation of the UGVs, i.e., a Nash equilibrium is formed when N drones are covered by N distinct UGVs. The potential corresponding to a pure Nash equilibrium is $\phi(a^*) = N\bar{u}$. Furthermore, multiple Nash equilibria exist.

Proof: A Nash equilibrium is an equilibrium state where no UGV wants to change its action unilaterally. It is stated in [4], [19] that the actions that maximize the potential $\phi(a)$ are the pure Nash equilibria of the game. It is evident that $\phi(a^*) = N\bar{u}$, and the corresponding actions are such that each UGV covers a drone because in any other case the potential $\phi(a) < N\bar{u}$ due to the definition of the utilities in Equation (4). For instance, if two UGVs are covering one drone while the other $(N - 2)$ UGVs are covering the remaining $(N - 2)$ drones, then $\phi(a) = (N - 0.5)\bar{u}$.

Since $N \geq 2$, the UGVs can be positioned around the drones in several distinct configurations. As an example,

consider the $N = 2$ case in Figure 2, where two drones are located at the waypoints w_2^C and w_4^C , while the waypoint w_3^C is empty. The UGVs R_1, R_2 can be positioned at the waypoints w_2^L and w_4^R as a Nash equilibrium. Alternatively, they can choose the waypoints w_4^L and w_2^R as a Nash equilibrium. Both allocations maximize the potential, resulting in $\phi(a^*) = 2\bar{u}$. Therefore, multiple Nash equilibria exist based on the UGV allocations. Obviously, the number of distinct Nash equilibrium action profiles a^* increases as N increases. This completes the proof.

In the following part, we design a learning algorithm that allocates the UGVs in real time.

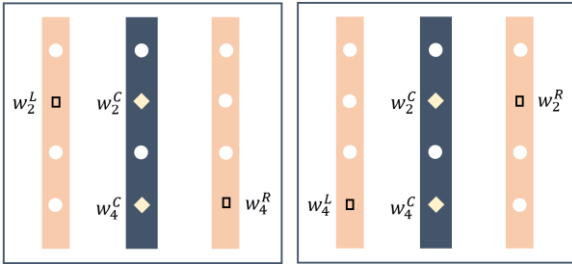


Figure 2. Illustration of two separate UGV allocations corresponding to two Nash equilibria for the same drone setting. White dots denote the waypoints, black rectangles denote UGVs, and the yellow squares denote the drones.

2.3.2 Learning algorithm design

In an exact potential game where player synchrony is satisfied, the Binary Log-Linear Learning (BLLL) algorithm can be used in a decentralized manner. In this part, we describe an application of the BLLL algorithm for our objective.

At each time step t , a UGV R_i is selected uniformly randomly from the players set. Then, UGV R_i decides on its action from its action set \mathcal{A}_i . To operate the game within a defined workspace by satisfying the collision avoidance requirement of Objective 1, we employ the concept of the constrained action sets $\mathcal{C}_i(a_i(t-1))$ for the one-step motion primitives of the UGVs.

At any time t , the constrained action set $\mathcal{C}_i(a_i(t-1))$ for a UGV R_i defines the allowable locations which both reside within the workspace and are collision-free. Assume that UGV $R_i \in \mathcal{S}_L$ resides on the waypoint $w_k^L, k \in \{1, \dots, K\}$ at time step $t-1$. We construct the constrained action set $\mathcal{C}_i(a_i(t-1))$ of UGV R_i as follows. Since R_i is allowed to move to only its neighbor waypoints $w_s^L, s \in \{k-1, k, k+1\}$, it can choose among three motion primitives $\{w_{k-1}^L, w_k^L, w_{k+1}^L\}$. If one of the waypoints w_{k-1}^L, w_{k+1}^L is occluded by another UGV or remains outside of the workspace W_L , then that waypoint is discarded from the constrained action set of R_i . Thus, $\mathcal{C}_i(a_i(t-1)) \subseteq \{w_{k-1}^L, w_k^L, w_{k+1}^L\}$. The same design procedure is used for the UGVs in the set \mathcal{S}_R by replacing the subscripts and superscripts L by R . As an example, consider the setting in Figure 3. The constrained action set of UGV R_1 is $\mathcal{C}_1(a_1(t-1)) = \{w_1^L, w_2^L, w_3^L\}$ because UGV R_1 does not have any neighbor UGV, and it can move to one of its

neighbor waypoints or stay at its current location at the next time step. The constrained action set of UGV R_2 is $\mathcal{C}_2(a_2(t-1)) = \{w_1^R\}$ because it resides at the edge of the workspace W_L , and its neighbor waypoint w_2^R is occluded by UGV R_3 . Thus, the only feasible action for UGV R_2 at time step t is its current location. Similarly, $\mathcal{C}_3(a_3(t-1)) = \{w_2^R, w_3^R\}$.

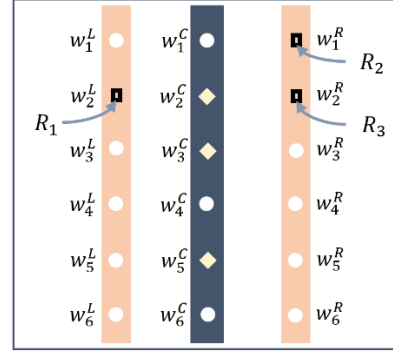


Figure 3. A sample workspace for the explanation of the constrained action sets.

After establishing the action set, robot R_i chooses its tentative action \hat{a}_i from the set $\mathcal{C}_i(a_i(t-1))$ using the following strategy:

1. $\pi(\hat{a}_i) = 1/3$ for $\hat{a}_i \in \mathcal{C}_i(a_i(t-1))$,
2. $\pi(a_i(t-1)) = 1 - (|\mathcal{C}_i(a_i(t-1))| - 1)/3$,

where $\pi(a_i)$ denotes the probability of choosing the action a_i . Notably, if all neighbor locations are discarded (due to occlusion by another UGV or violation of the workspace boundary condition), then $\hat{a}_i(t) = a_i(t-1)$. Afterwards, R_i moves to $\hat{a}_i(t)$ with the following strategy:

$$\pi(\hat{a}_i(t)) = \frac{e^{\beta U_i(\hat{a}_i(t), a_{-i}(t-1))}}{e^{\beta U_i(\hat{a}_i(t), a_{-i}(t-1))} + e^{\beta U_i(a_i(t-1))}}, \quad (9)$$

$$\pi(a_i(t-1)) = \frac{e^{\beta U_i(\hat{a}_i(t), a_{-i}(t-1))}}{e^{\beta U_i(\hat{a}_i(t), a_{-i}(t-1))} + e^{\beta U_i(a_i(t-1))}},$$

$$\pi(a_i) = 0 \quad \forall a_i \in \mathcal{C}_i(a_i(t-1)) \setminus \{a_i(t-1), \hat{a}_i(t)\},$$

where $\beta \geq 0$ is the so-called forgetting factor which adjusts UGV R_i 's tendency to choose a suboptimal solution. Notably, as β approaches 0, the UGV tends to select its tentative action $\hat{a}_i(t)$ or its current action $a_i(t-1)$ with equal probability, i.e., $\pi(\hat{a}_i(t)) = \pi(a_i(t-1)) = 1/2$. As β goes to infinity, the UGVs tend to select the optimal action a^* with arbitrarily high probability.

Remark 2: The structure of the players' strategy in Equation (9) is designed by observing the form of the stochastically stable actions of the game. Particularly, if certain conditions are satisfied by the constrained action sets $\mathcal{C}_i(a_i(t-1)), i \in \{1, \dots, N\}$, then the evolution of the game induces a Markov chain with a unique stationary distribution characterized by the potential function $\phi(a)$ [4]. Notably, the

form of Equation (9) is common for finite-player distributed resource allocation games; see e.g., [4], [7], [8], [13-19].

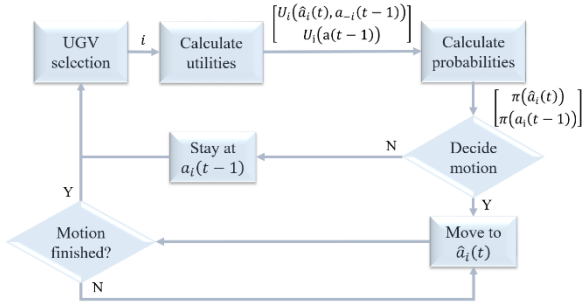


Figure 4. Flow diagram of the proposed BLLL algorithm

A flow diagram of the proposed BLLL algorithm is given in Figure 4. To start the process at each time step t , a UGV $R_i, i = \{1, \dots, N\}$, is chosen uniformly randomly. Then, UGV R_i chooses an action \hat{a}_i from its constrained action set $\mathcal{C}_i(a_i(t-1))$ and calculates the probabilities $\pi(\hat{a}_i), \pi(a_i(t-1))$ based on the utilities $U_i(\hat{a}_i(t), a_{-i}(t-1)), U_i(a_i(t-1))$. Finally, it decides on its action, i.e., decides whether to move to \hat{a}_i or stay at $a_i(t-1)$ based on the probability distribution defined by $\pi(\hat{a}_i), \pi(a_i(t-1))$. If R_i chooses to move to \hat{a}_i , then the decision process stops and waits for the UGV to finish its motion. This process is repeated for each time step, leading to a repetitive game.

The main advantage of the proposed game theoretical framework lies in its practical simplicity. The entire framework is comprised of two steps: Player selection and probability distribution calculation by the selected player. The player selection part is a decision mechanism from a uniform distribution, and thus it possesses no computational burden. In the second step, the selected player first calculates the probability distribution based on the utilities and then chooses to whether it should move to $\hat{a}_i(t)$ or stay at the current location. Notably, the required information for this step is the constrained action set $\mathcal{C}_i(a_i(t-1))$ and parameter $\eta_j^i[t]$, which can be obtained from the neighbors of the players. Thus, the required information can be acquired by sensing/communication modules with limited range onboard of the UGVs. This property makes the proposed distributed framework favorable compared with centralized approaches.

If the constrained action sets of the players satisfy the feasibility and reversibility conditions defined in [4] for all time steps, then the BLLL algorithm enables the UGVs to choose actions so that they spend most of their operation time at optimal locations. This behavior is also referred to as asymptotic behavior because the UGVs tend to choose optimal actions for sufficiently large β as time goes to infinity. However, since the constrained action sets are designed to satisfy the collision avoidance requirement of Objective 1, the conditions in [4] may not be satisfied for all time steps. Nevertheless, the BLLL algorithm showed near optimal performance in our simulations and resulted in

significant increase in the potential value $\phi(a)$ in the first few time steps.

3 Results and discussion

This section presents the evaluation results of the proposed approach and a detailed discussion about the results.

3.1 Simulation setup

Several MATLAB simulations were performed for the derived fictitious game. The simulations used ideal conditions where the UGV kinematics are ignored, and the UGVs were assumed to move from a waypoint to a destination waypoint between two consecutive time steps. A fictitious game consisting of ten drones and ten UGVs ($N = 10$) was simulated, and the utilities in Equation (4) and (5) were used with $\bar{u} = 2$. Notably, the steady-state properties of the algorithm are independent from the number of robots, but the transient characteristics may alter based on the number of UGVs and their initial conditions. The boundary conditions were taken as $y_{\min} = -10, y_{\max} = 12$ m, i.e., the UGVs moved within the boundary $y_i[t] \in [-10, 12]$ m for all $t \in \{0, 1, \dots, T_f\}$. The x-axis separation of the drones and the UGVs is taken as $|x^i[t] - x_D^i[t]| = 2$ m on both sides of the drones, noting that this parameter does not affect the algorithm's performance. The drones were kept stationary at the positions $p_i^D[k] = [0 \ y_i^D]^T$ m, where y_i^D ranged from -8 to 10 m with two-meter separation between two consecutive drones. A sample simulation configuration is given Figure 5.

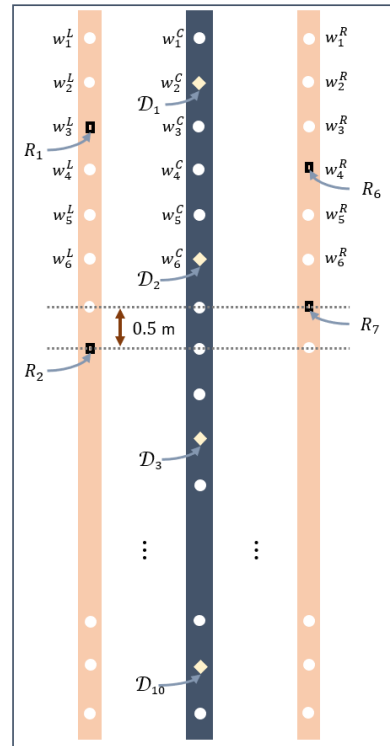


Figure 5. A sample initial configuration used in simulations. No drone was covered by a UGV at the initial time step, resulting in $\phi(a(0)) = 0$.

The UGVs were initiated at random locations with $x_i[0] = \pm 2$ m and $y_i[0]$ varying between y_{\min} and y_{\max} . Remarkably, the UGVs were not engaged with any drone initially, as seen in Figure 5. The pure Nash equilibria for this setting results in the maximum potential $\phi_{\text{opt}} = 10\bar{u} = 20$, which corresponds to the case that each UGV engages with different drones. If two UGVs engage with one drone, then we obtain $\phi(a) < 10\bar{u}$. For instance, if nine UGVs engage with nine separate events, and the remaining UGV engages with an event that was already covered by another UGV, then the potential would be $\phi_{\text{sub}} = 9.5\bar{u}$. Particularly, such cases occur when some UGVs engage with the same event, and at least one waypoint exists between two consecutive drones. For instance, consider the drone placement given in Figure 5, where drone \mathcal{D}_1 is at waypoint w_2^c , and the neighbor waypoints w_1^c, w_3^c do not include any drone. If two UGVs, say R_1 and R_6 cover drone \mathcal{D}_1 , at a future time step, they would not want to leave the waypoint w_2^c because the tentative actions in their constrained action sets will not include another drone (and thus the utility of moving will be less than the utility of staying).

3.2 Results

The forgetting factor β significantly affects the UGVs' motion behavior. Thus, several experiments were conducted to analyze the effect of β on the overall performance. Remarkably, as β approaches zero, the UGVs tend to choose to move to the selected action $\hat{a}_i(t)$ or stay at current location $a_i(t-1)$ with equal probability. On the other hand, as β goes to infinity, the UGVs tend to find and stay on the actions which maximize their utilities, at the expense of leaving some events explored less. We observed that choosing $\beta >$

0.9 does not change the behavior significantly compared with $\beta = 0.9$. Thus, ten simulations were conducted for each of the β values from the set $\beta = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9\}$, where each simulation was run for $T_f = 1000$ time steps. The potential function ϕ is recorded for each experiment.

Figure 6 presents the distribution of ϕ values over time such that the shaded region shows the interval between the minimum and maximum ϕ values, and the red curve shows the mean value at that time step t . It can be observed from this figure that, in all simulations, the potential ϕ increases rapidly after initialization which means that the UGVs engage with the event locations around their initial locations, as desired. Another observation is that as β approaches zero, to search for more events that are not in the vicinity of the UGVs' initial locations, the UGVs tend to choose the actions that have small utilities more frequently. This result is reflected in Figure 6 in the sense that the average potential remained around $\phi = 11$ for $\beta = 0.2$, and $\phi = 15$ for $\beta = 0.4$, whereas it could reach its maximum (i.e., $\phi = 20$) for $\beta = 0.6$ and $\beta = 0.8$ in some simulation runs. On the other hand, it was observed that the maximum ϕ value was not achieved in any simulation for $\beta = 0.9$. This result mainly stems from the fact that as β increases, a UGV tends to remain engaged to an event which maximizes its utility because the utility $\pi(\hat{a}_i(t))$ of choosing action \hat{a}_i becomes quite small.

The distributions of the UGV locations in a sample run for each of the β values in the set $\beta = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9\}$ are presented in Figure 7. It can be observed that when $\beta = 0.2$, to explore the maximum possible area, the UGVs move almost uniformly randomly across the y-axis.

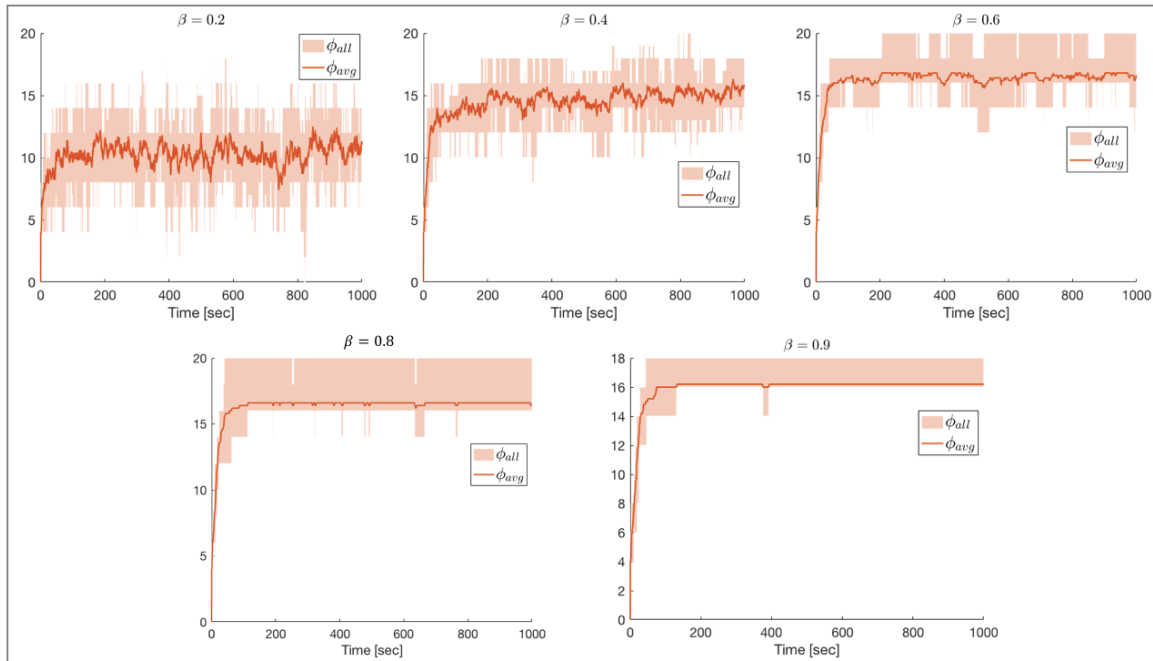


Figure 6. Potential function ϕ values over time for five β values. Each graph presents the results of 10 simulations. In each graph, the orange-colored shaded region shows the interval within the maximum and minimum ϕ values, and the red curves denote the mean ϕ values calculated at that time step.

Thus, because of the tendency to exploration, all drone locations are visited at least once by at least one UGV. As β value increases, the UGVs tend to stay at the drone locations once they are found. Therefore, the UGVs spend more time at the desired locations for high β values as compared to low β values. However, the behavior observed for high β values may also lead to missing some drones because the UGVs tend to show exploitation behavior rather than exploration. This fact can be seen in the bottom three graphs (i.e., $\beta \geq 0.6$): Although at least eight drones are covered during most of the simulation time (yellow-colored bars), some drones were covered for a short duration (dark blue colored bars). Higher β values are not illustrated for brevity because they show quite similar behavior with $\beta = 0.9$.

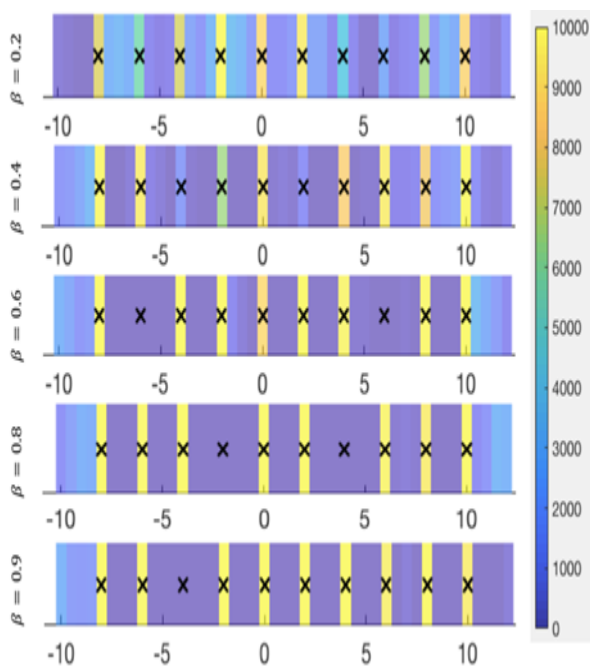


Figure 7. The positional distributions of the UGVs for five different β values. The black crosses indicate the drones' locations. Each vertical bar corresponds to a region of length of 0.5 m. The color bar on the right shows the color code which indicates the coverage density of a specific location by a UGV.

Finally, to demonstrate the adaptability of the UGVs to changing drone positions, all drones are moved to new locations at specific time steps during the simulation (Figure 8). In this test with $\beta = 0.6$, the UGVs first found a near optimal allocation ($\phi(a) \geq 16$) in around 100 steps. Then, the drones were repositioned at time steps $t = 334$ and $t = 667$, where the potential diminished ($\phi(a) = 0$) because no drone was covered by a UGV in the new configurations. It can be observed that the UGVs moved to the new configurations and increased the potential function swiftly right after the drones were reconfigured. Although the maximum potential was not achieved in this test ($\phi(a^*) = 20$), it is worth noting that the proposed algorithm can react to the varying drone configurations swiftly.

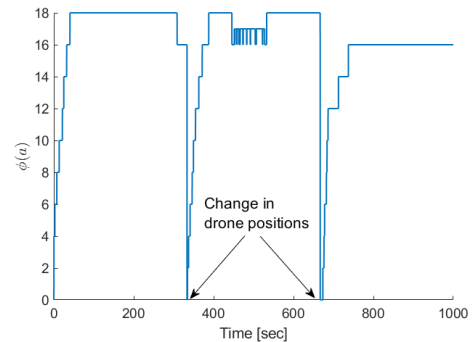


Figure 8. The potential $\phi(a)$ for changing drone configurations. UGVs position themselves to increase swiftly the potential for the new drone configurations.

3.3 Practical considerations and remedies

The original BLLL algorithm with the players' actions satisfying feasibility and reversibility conditions leads to convergence to pure Nash equilibria and potential maximization. However, as stated in Section 2, due to the modification for collision avoidance, the proposed BLLL algorithm with the proposed constrained action sets lacks this property. Furthermore, due to the physical constraints on the motion of the UGVs and possible asynchrony among the players, one may need to modify the BLLL algorithm. We discuss such modifications and their effects in this section.

While the UGVs are assumed to be synchronized in the fictitious game, and a UGV runs the game algorithm at each time step, this assumption may be difficult to satisfy in real-world applications because it requires to have a continuous and flawless communication mechanism among the UGV team. In other words, to comply with the requirement that only one player can make decision at a time step, the UGVs must communicate. As a modification, one can assume that a UGV can decide marginally without considering the other UGVs, turning the fictitious game design to a real-time distributed application. In this modified framework, each UGV $R_i, i = \{1, \dots, N\}$ can repeat its game loop once its previous action (moving to \hat{a}_i or staying at current location) is completed, without obeying a common synchronized clock. In this case, the designer must modify the function in Equation (1), e.g., by increasing the collision avoidance radius of the UGVs.

Secondly, although the UGVs are assumed to move between the designated waypoints $w_k, k \in \{1, \dots, K\}$, it may not be feasible to control the UGV motion accordingly. Evidently, precise UGV motion between waypoints requires having a low-level motion control mechanism integrated with a localization module among the robots. Particularly, the nonholonomic UGV case needs special attention because the UGVs may be desired to satisfy a certain heading angle and a docking mechanism at the waypoints. Therefore, one can assume that the UGVs can choose their actions and stop when a certain condition on the distance to the new action satisfies a certain condition. This modification avoids undesired extra time required to position the UGVs at the exact action location and enables fast response to the change

in the targets' locations. We aim at addressing such modifications in our future works.

Finally, when transitioning from simulation world to real-world applications, one needs to consider the sensing and communication units onboard the UGVs. As a viable option, ultrawideband (UWB) modules can be used on drones and UGVs for both distance sensing and inter-robot communication. However, UWB modules with time-of-flight mechanism produce additive bounded noise on distance measurements, and integrating these noise effects into a repeated game changes the game structure and requires particular attention. Notably, the design of the utilities U_i^j needs to be modified to handle measurement noises. For instance, a small threshold around zero can be used in place of the condition $\zeta_{kj}[t] = 0$.

4 Conclusion

We have addressed a particular coverage problem that can arise in several industrial applications utilizing mobile unmanned ground vehicles (UGVs). Specifically, we consider a scenario where a group of UGVs are tasked with responding to sporadic events at a workplace by covering specific locations on two sides of the workplace. To address this challenge, we have formulated the objective as a coverage game with carefully designed agent utilities. Our analysis has revealed that the proposed approach constitutes a potential game with an equally shared utility design, which enables the use of common learning algorithms, such as the BLLL. Importantly, the framework has been designed to be distributed and decentralized, allowing for anonymous agent identities. Simulation results have demonstrated that the UGVs effectively operate at optimal locations where the potential function is maximized, resulting in efficient coverage of the desired areas.

Acknowledgment

This paper has been produced benefiting from the 2232 International Fellowship for Outstanding Researchers Program of TÜBİTAK (Project No: 118C348). However, the entire responsibility of the paper belongs to the owner of the paper. The financial support received from TÜBİTAK does not mean that the content of the publication is approved in a scientific sense by TÜBİTAK.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 10%

References

- [1] F. Chen, M. Selvaggio and D. G. Caldwell, Dexterous grasping by manipulability selection for mobile manipulator with visual guidance, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15 (2), 1202-1210, 2019, <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2879426>.
- [2] G.B. Dai and Y.C. Liu, Distributed coordination and cooperation control for networked mobile manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64 (6), 5065-5074, 2017, <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2642880>.
- [3] H. Engemann, S. Du, S. Kallweit, P. Cönen, and H. Dawar, OMNIVIL—An Autonomous mobile manipulator for flexible production. *Sensors*, 20 (24), 7249, <https://doi.org/10.3390/s20247249>.
- [4] J. R. Marden, G. Arslan and J. S. Shamma, Cooperative control and potential games. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 39 (6), 1393-1407, 2009, <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2009.2017273>.
- [5] J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas and F. Bullo, Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20 (2), 243-255, 2004, <https://doi.org/10.1109/TRA.2004.824698>.
- [6] M. R. Olfati-Saber, J. A. Fax and R. M. Murray, Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, 95 (1), 215-233, 2007, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.887293>.
- [7] J. R. Marden and J. S. Shamma, Game theory and control, annual review of control. *Robotics, and Autonomous Systems*, 1(1), 105-134, 2018, <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117105102>.
- [8] G. Arslan, J. R. Marden and J. S. Shamma, Autonomous vehicle-target assignment: a game-theoretical formulation, *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 129 (5), 584-596, 2007, <https://doi.org/10.1115/1.2766722>.
- [9] D. Monderer, L.S. Shapley, Potential games. *Games and Economic Behavior*, 14 (1), 124-143, 1996, <https://doi.org/10.1006/game.1996.0044>.
- [10] P. Li, H. Duan, A potential game approach to multiple UAV cooperative search and surveillance. *Aerospace Science and Technology*, 68 (1), 403-415, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.05.031>.
- [11] U.O. Candogan, I. Menache, A. Ozdaglar and P.A. Parrilo, Near-optimal power control in wireless networks: a potential game approach. 2010 *Proceedings IEEE INFOCOM*, 2010,1-9, San Diego, CA, USA, <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2010.5462017>.
- [12] P. Yi, Y. Zhang and Y. Hong, Potential game design for a class of distributed optimization problems. *Journal of Control and Decision*, 1 (2), 166-179, 2014, <https://doi.org/10.1080/23307706.2014.899111>.
- [13] J. R. Marden, State based potential games. *Automatica*, 48 (12), 3075-3088, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.08.037>.
- [14] S. Rahili and W. Ren, Game theory control solution for sensor coverage problem in unknown environment. 53rd *IEEE Conference on Decision and Control*, 1173-1178, Los Angeles, CA, USA, 2014, <https://doi.org/10.1109/CDC.2014.7039540>.
- [15] M. Zhu and S. Martinez, Distributed coverage games for energy-aware mobile sensor networks. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 51 (1), 1-27, 2013, <https://doi.org/10.1137/100784163>.
- [16] S. Rahili, J. Lu, W. Ren and U. M. Al-Saggaf, Distributed coverage control of mobile sensor networks in unknown environment using game theory:

- algorithms and experiments. IEEE Transactions on Mobile Computing, 17 (6), 1303-1313, June 2018, <https://doi.org/10.1109/TMC.2017.2761351>.
- [17] E. Paraskevas, D. Maity and J. S. Baras, Distributed energy-aware mobile sensor coverage: A game theoretic approach. 2016 IEEE American Control Conference (ACC), 6259-6264, Boston, MA, USA, 2016, <https://doi.org/10.1109/ACC.2016.7526653>.
- [18] J. Ni, G. Tang, Z. Mo, W. Cao and S. X. Yang, An improved potential game theory based method for multi-uav cooperative search. IEEE Access, 8, 47787-47796, 2020, <https://doi.org/10.1109/access.2020.2978853>.
- [19] J. R. Marden and J. S. Shamma, Revisiting log-linear learning: Asynchrony, completeness and payoff-based implementation. Games and Economic Behavior, 75 (2), 788-808, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.geb.2012.03.006>.





Yol tüneli yangınında duvar kaplamanın ısıl etkisinin sayısal incelenmesi

Numerical investigation of the thermal effect of wall coating in road tunnel fire

Onur Yemenici^{1,*} , Barbaros Küçük² 

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bursa/Türkiye
² Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü Tünel Bak. İşl. Şef., Bilecik/Türkiye

Öz

Bu çalışmada 1:100 ölçekli doğal havalandırılmalı bir yol tüneli yangınında duvar kaplamanın ısıl etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Dış yüzeyi toprak kaplı beton tünel modelinin iç yüzeyine Alüminyum, Nikel ve Kalsiyum-silikat kaplama kullanılarak üç katmanlı yapı oluşturulmuştur. Modelleme bir yol tüneli içerisinde yanma sürecunda oluşan gaz çıkışına bağlı sabit ısı akısında yapılmıştır. Gazın çıkış sıcaklığı 950 K, ısı salınım oranı 50 MW ve kütleli debisi 48.6 kg/s olarak seçilmiştir. Model tasarımı ve akış alanının çözümü hem zamana bağlı ve hem de geçici rejimde ANSYS/FLUENT programı ile yapılmış ve analizlerde standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sonuçlar bir yol tüneli yangınındaki sıcaklık dağılımının beton duvarlar üzerine eklenecek üçüncü bir katmandan etkilendiğini göstermiştir. Üçüncü katman olarak Alüminyum ve Nikel tabaka kullanılan modellerde ısı transferi iki katmanlı modele göre daha fazla iken, Kalsiyum-silikat tabakası kullanılan modelde farkın çok az olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yol tüneli yangını, Duvar kaplaması, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Isı iletimi

1 Giriş

Yol tünelleri karayolu ulaşımında sağladığı kolaylık ve trafik akışını hızlandırması yönünden önemli olmasının yanı sıra olası bir yangında müdahalesi zor ve zaman aldığından can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Tünel yangınları üzerine literatürde yapılan çalışmaların çoğu havalandırma ve ısı salınım oranı hesaplaması üzerine yapılırken, son zamanlarda tünel duvarlarının bu yangınlar üzerindeki etkileri üzerine de araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin, Saito ve Yamauchi [1] yaptıkları çalışmada FDS (Fire Dynamic Simulator) yazılımını kullanarak duvar yüzeyleri üzerinden ısı kaybını araştırmışlardır. Zamana bağlı yaptıkları analizlerde dokuz farklı malzeme kullanmışlar ve sonuç olarak tavan yüzeyinin altındaki gaz sıcaklığının ısıl ataletine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Xu vd. [2] ısıl modellemelerin karşılaştırmalarını yapmışlar ve kütle transferi-hacimsel ısı kaynağı modelinin avantajları üzerinde durmuşlardır. Vega vd. [3] yaptıkları çalışmalarında 50 MW'lık bir ısı salınım hızında çıkan gazın sıcaklığının 950 K alınabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca ışının ihmal edilebileceğini ve ısının %35 azaltılabileceğini

Abstract

In this study, the thermal effect of the wall coating in a 1:100 scale natural ventilated road tunnel fire was numerically investigated. A three-layer structure was formed by using Aluminum, Nickel and Calcium-silicate coating on the inner surface of the concrete tunnel model, the outer surface of which was covered with soil. The modeling was carried out at a constant heat flux depending on the gas output formed as a result of combustion in a road tunnel. The outlet temperature of the gas is 950 K, the heat release rate is 50 MW and the mass flow rate is 48.6 kg/s. The model design and solution of the flow field were made with the ANSYS/FLUENT program both in time dependent and transient regime, and the standard k-ε turbulence model was used in the analyses. The results showed that the temperature distribution in a road tunnel fire is affected by a third layer to be added over the concrete walls. In the models using Aluminum and Nickel layer as the third layer, the heat transfer was higher than the two-layer structure, while the difference was found to be very small in the model using the Calcium-silicate layer.

Keywords: Road tunnel fire, Wall layer, Computational fluid dynamics, Heat conduction

vurgulamışlardır. Tomar vd. [4] pasif koruma olarak tünel duvarlarına uygulanan Kalsiyum-silikat tabakasının etkisini incelemişlerdir. Ahşap paletlerden oluşturuldukları simülasyonlarında iki farklı model oluşturmuşlar ve sonuçlarını Runehamar testlerinin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. 30 dakikalık yangın boyunca Kalsiyum-silikat levhalara sahip tünelin beton tünelle kıyasla daha yüksek HRR (Heat Release Rate) ve gaz sıcaklığına yol açtığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kalsiyum silikat ve beton arasındaki farkın zamana göre değiştiğini ve tepe HRR değerinin aynı kaldığını belirtmişlerdir. Gao vd. [5] yaptıkları çalışmada 1/3.7 ölçeğinde beton bir tünel içerisinde 12-120 kW kaynaklar kullanarak sıcaklık dağılımlarını incelemişlerdir. Sonuçta özellikle yan duvarlarda sıcaklık dağılımının monoton olmadığını bildirmişlerdir. Bir tünelde gerçekleşen yangında yangın yerine bağlı olarak duman hareketinin değişimi ise Wang ve Wang [6] tarafından incelenmiştir. Modic [7] yol tünellerinde yangın simülasyonunu yapmışlar ve simülasyonunun sonuçlarını hava hızı, hava sıcaklığı ve duvar sıcaklığına bağlı olarak yorumlamışlardır. Wei vd. [8]

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oseckin@uludag.edu.tr (O. Yemenici)

Geliş / Received: 06.05.2023 Kabul / Accepted: 27.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1293197

tünel yangınlarından uzak alandaki tavan sıcaklık dağılımında duvar faktörünün analitik çalışmasını yapmışlardır. Caliendo vd. [9] yangın tahliye sürecinde tünel kullanıcılarının riske maruz kalma durumlarını değerlendirmek için uygun bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) modeli geliştirmişlerdir. Tablo 1’de gerçek boyutlu tünellerde meydana gelen yangınlarla ilgili yapılmış testlere ait bilgiler verilmiştir. Bu testlerin bir kısmı kullanılmayan tünellerde yapılmıştır. İlk büyük ölçekli test 1965 yılında İsviçre’de Ofenegg Tünelinde gerçekleştirilerek, benzin tanklarının neden olduğu yangınlarda tünelin havalandırma kapasiteleri değerlendirilmiştir. Bu test tünel havalandırma tasarımının temelini oluşturmuştur (Harter [10]). EUREKA (Firetune Project) testleri ise Norveç’te kullanılmayan Repparfjord Tüneli’nde yapılmış en kapsamlı çalışmalardan biridir. Bu çalışmada oksijen tüketimi ilk kez büyük ölçekli bir tünelde gerçek araçlara uygulanmıştır ve havalandırma oranı ile yangın büyüme eğilimi verilmiştir (Haack [11]).

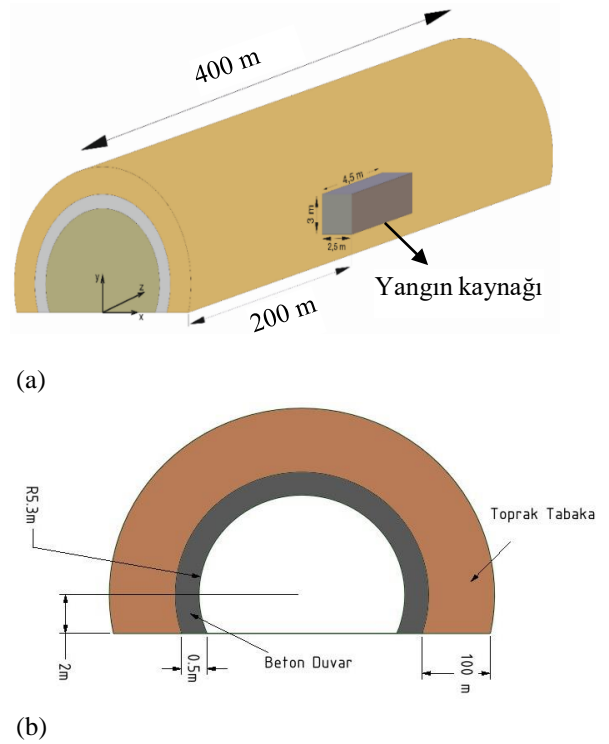
Tablo 1. Gerçek boyutlara sahip tünellerde yapılan çalışmalar (Ingason [12])

Test Programı, Yer, Yıl	Test Sayısı	Yangın Kaynağı	En Yüksek HRR Aralığı (MW)
Ofenegg, İsviçre, 1965	11	Benzin Havuzu	11-80
Glasgow, 1975	5	Gaz/Gazyağı Havuzu	2-8
Zwenberg, Avusturya, 1974-1975	30	Benzin Havuzu/Odun /Lastik	8-21
P.W.R.I., Japonya, 1980	16	Benzin Havuzu/ Yolcu Aracı/Otobüs	9-30
P.W.R.I., Japonya, 1980	8	Benzin Havuzu/ Otobüs	9
TUB-VTT, Finlandiya, 1985	2	Ahşap Beşik	1.8-8
EUREKA EU499, Norveç, 1990-1992	21	Ahşap Beşik/Heptan Havuzu/ Otomobiller/ Tren/Ağır Vasıta	2-120
Memorial, ABD, 1993-1995	98	Fuel Oil	10-100
Shimizu No.3, Japonya, 2001	10	Benzin Havuzu/ Otobüs/ Otomobiller	2-30
2. Benelux Tüneli, Hollanda, 2002	14	n-Heptane Toluene, Otomobil, Ağır Yüklü Tır	3-26
Runehamar Tüneli, Norveç, 2003, 2013	4	Selüloz, Plastik, Mobilya, Tahta Palet	70-203
Brunsborg, İsveç, 2011	2	Metro	77
San Pedro Tüneli, 2012	1	Ağır Yüklü Tır	150
Carleton Laboratuvarı, 2011	2	Tren ve Metro	32-55

Bu sayısal çalışmada doğal havalandırma 1:100 ölçekli bir yol tünelinde meydana gelen bir yangında duvar kaplamasının etkisi incelenmiştir. Analizlerde tünel modelinin iç yüzeyinde Alüminyum (Al), Nikel (Ni) ve Kalsiyum-silikat (Calc) olmak üzere 3 farklı kaplama malzemesi kullanılmıştır.

2 Materyal ve metod

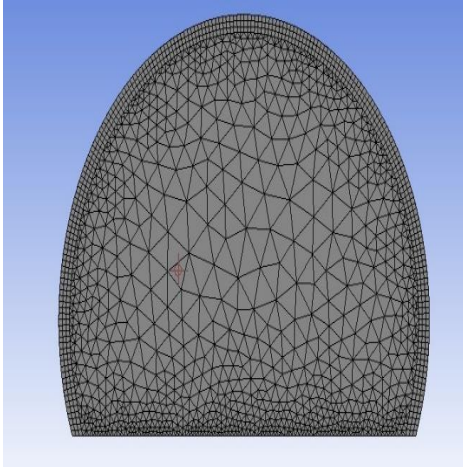
Bu çalışmada 400 m uzunluğa sahip 1:100 ölçekli tünel modellemesi ve analizler ANSYS/FLUENT programı ile yapılmıştır. Yol tünelleri genel yapıları itibarıyla toprak içine gömülü betonarme yapılar olduklarından iki katmanlıdır. Analizlerde modelin iç yüzeyine Alüminyum, Nikel ve Kalsiyum-silikat ile 3. bir tabaka oluşturularak ısı etkileri incelenmiştir. Yangın kaynağı olarak tünel girişinden 200 m mesafede 3m x 2.5m x 4.5m boyutlarında hacimsel bir ısı kaynağı tasarlanmıştır. Yol tüneli modelinin genel görünüşü ve kesit detayı Şekil 1 (a) ve (b)’de sırasıyla gösterilmiştir. Çözüm için oluşturulan tünel çapı 10.6 m, beton duvarın kalınlığı 0.5 m ve toprak tabakanın kalınlığı 100 m olarak belirlenmiştir.



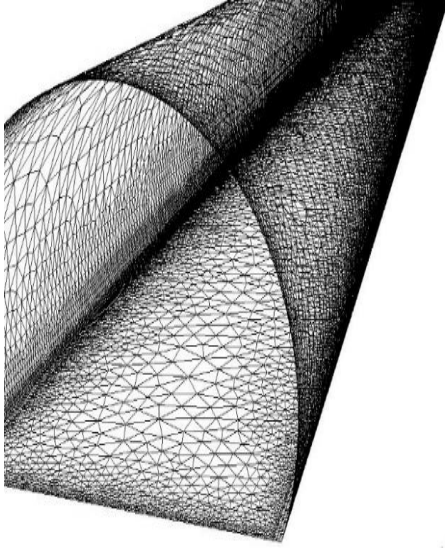
Şekil 1. Tünel modelinin (a) genel görünüşü ve (b) kesit detayı

Şekil 2 (a) ve (b)’de çözüm alanı içerisinde oluşturulan ağ yapısının detayları verilmiştir. Analizlerde oluşturulan ağ ağırlıklı olarak tetrahedral hücrelerden meydana gelmektedir. Elde edilen ağ yapısının çarpıklık oranı 0.61 ve minimum ortogonal kalitesi 0.38 olarak iyi seviyededir. Analizlerin doğruluğunu arttırmak için tünel duvarı olarak modellenen bölgede Inflation metodu kullanılarak 3 tabakalı ve daha kübik yapılar oluşturulmuştur. Duvara yakın bölgede inflation metodunun kullanılması duvar etkilerinin daha iyi analiz edilmesini sağlamaktadır (Udemy [13]). Yol

tüneli modeli için yapılan ağdan bağımsızlık çalışması en kaba, orta ve en ince ızgara olmak üzere sırasıyla 1222490, 2214102 ve 2594011 hücre sayısı ile duvardan geçen ısı miktarına bağlı olarak yapılmıştır. Duvardan geçen ısı miktarı değerleri 241.69 W, 239.53 W ve 239.24 W olarak sırasıyla en kaba, orta ve en ince ızgara için elde edilmiştir. Sonuç olarak analizlerde orta ızgara yapısı olan 2214102 hücre sayısının doğruluk açısından yeterli olduğu belirlenmiş ve Shell conduction metodu kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2. Akış alanı ağ yapısı

Çalışmada ısı kaynağı olarak hacimsel ısı kaynağı yanma modeli kullanılmış ve modelleme bir yol tünel içerisinde yanma sonucunda oluşan gaz çıkışına bağlı sabit ısı akısında yapılmıştır. Isı salınım oranı 50 MW ve gazın çıkış sıcaklığı 950 K olarak seçilmiştir. Tünel tabanı adyabatik, duvar ilk sıcaklığı ve ortam sıcaklığı ise 285.15 K olarak alınmıştır. HRR miktarı ölçek modele göre 3250 W olarak hesaplanmış ve buradan çıkan sıcak havanın kütsel debisi $48.6 \cdot 10^{-4}$ kg/s olarak elde edilmiştir. Vega vd. [3]' nin belirttiği gibi ışınlam etkileri ihmal edilmiş ve ışınlamın ihmaline bağlı olarak HRR miktarı %35 azaltılmıştır.

Tablo 2' de tünel modelinde kullanılan toprak, beton, Kalsiyum-silikat, Nikel ve Alüminyum malzemelere ait ısı özellikler gösterilmektedir.

Tablo 2. Modelde kullanılan malzemelerin ısı özellikleri

Malzeme	Yoğunluk	Özgül	İletim	Isı Yayılma	Isıl Depolama	Isıl
Adı	(kg/m ³)	Isı	Katsayısı	Katsayısı	Kapasitesi	Atalet
		(J/kg K)	(W/mK)	(m ² /s)	(J/Km ²)	(J/m ² Ks ^{1/2})
Beton	2100	880	1.5	8.11×10^{-7}	1.84×10^6	1664.9
Kalsiyum	820	1000	0.16	1.95×10^{-7}	8.20×10^5	362.2
Silikat						
Nikel	8900	460.6	91.74	2.23×10^{-5}	4.01×10^6	19392.6
Toprak	2050	1840	0.52	1.37×10^{-7}	3.77×10^6	1400.5
Alüminyum	2719	871	202.4	8.54×10^{-5}	2.37×10^6	21893.6

Akış alanının çözümü için yapılan analizlerde standart k-ε türbülans modeli geliştirilmiş duvar fonksiyonları ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca analizlerde SIMPLE çözüm yaklaşımı kullanılmış ve denklemler ikinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi ile çözülmüştür. Basınç tabanlı yapılan analizlerde yer çekimi etkisi de dâhil edilerek, zamana bağlı, geçici rejim ile çözümler yapılmıştır. Denklem (1), (2) ve (3)' de sırasıyla süreklilik, momentum ve enerji denklemleri verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{u_z}{r \sin \theta} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} - \frac{u_\theta^2 + u_\phi^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left(\nabla^2 u_r - \frac{2u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{2}{r^2} u_\theta \cot \theta - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right) \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \quad (3)$$

$$k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \phi$$

Burada ϕ yayılımı enerjisini ifade etmektedir. Standart k-ε türbülans modelinde k türbülans kinetik enerjisi ifade ederken, ε yayılımını ifade etmektedir. k ve ε transport denklemleri sırasıyla Denklem (4) ve (5)' te verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i}(k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

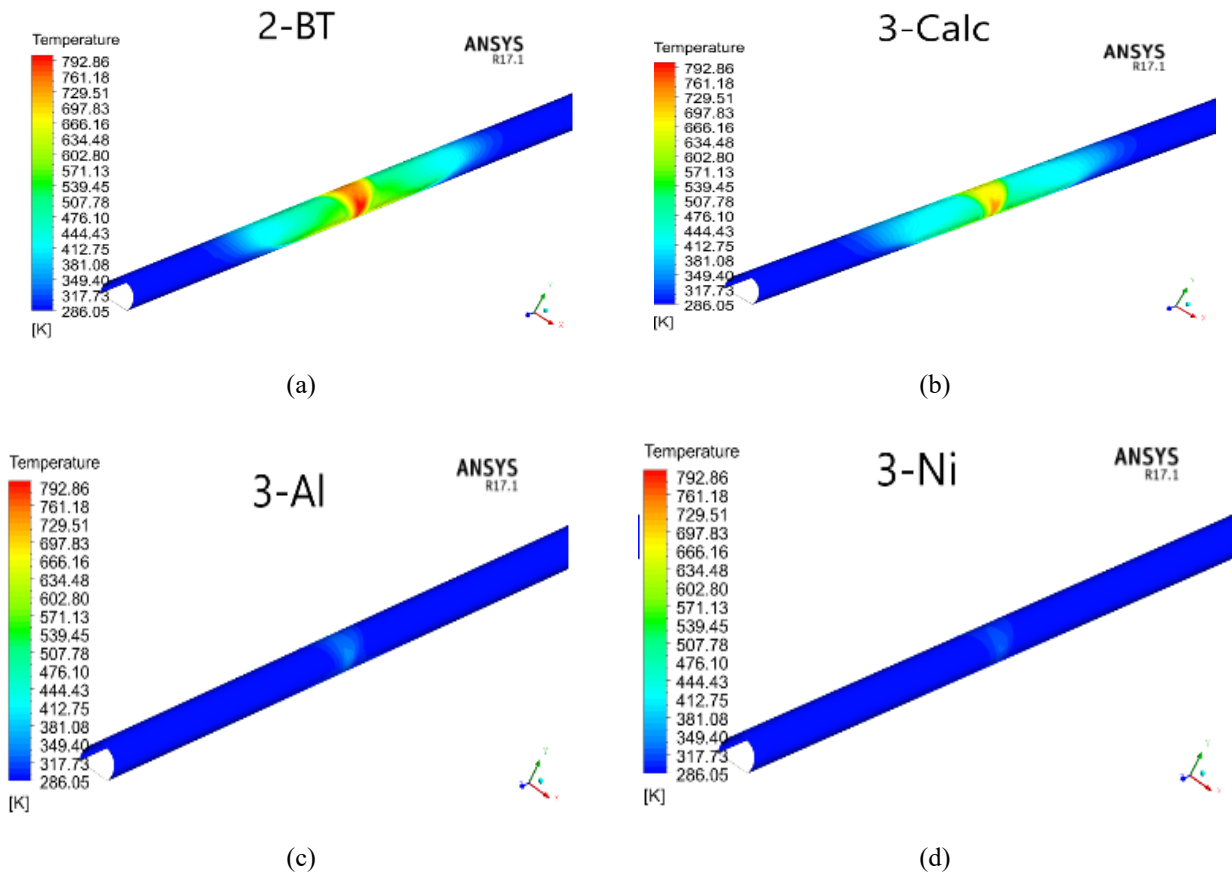
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon \quad (5)$$

Burada kaldırma kuvveti ve hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerjiler sırasıyla P_b ve P_k ile tanımlanırken, Y_M türbülansın tüm yayılma hızına oranını ifade etmektedir. Ayrıca $C_1 = \max \left[0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\epsilon}$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ve $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$ ile tanımlanır ve $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k ve σ_ϵ değerleri sırasıyla 1.44, 1.9, 1.0 ve 1.2'dir.

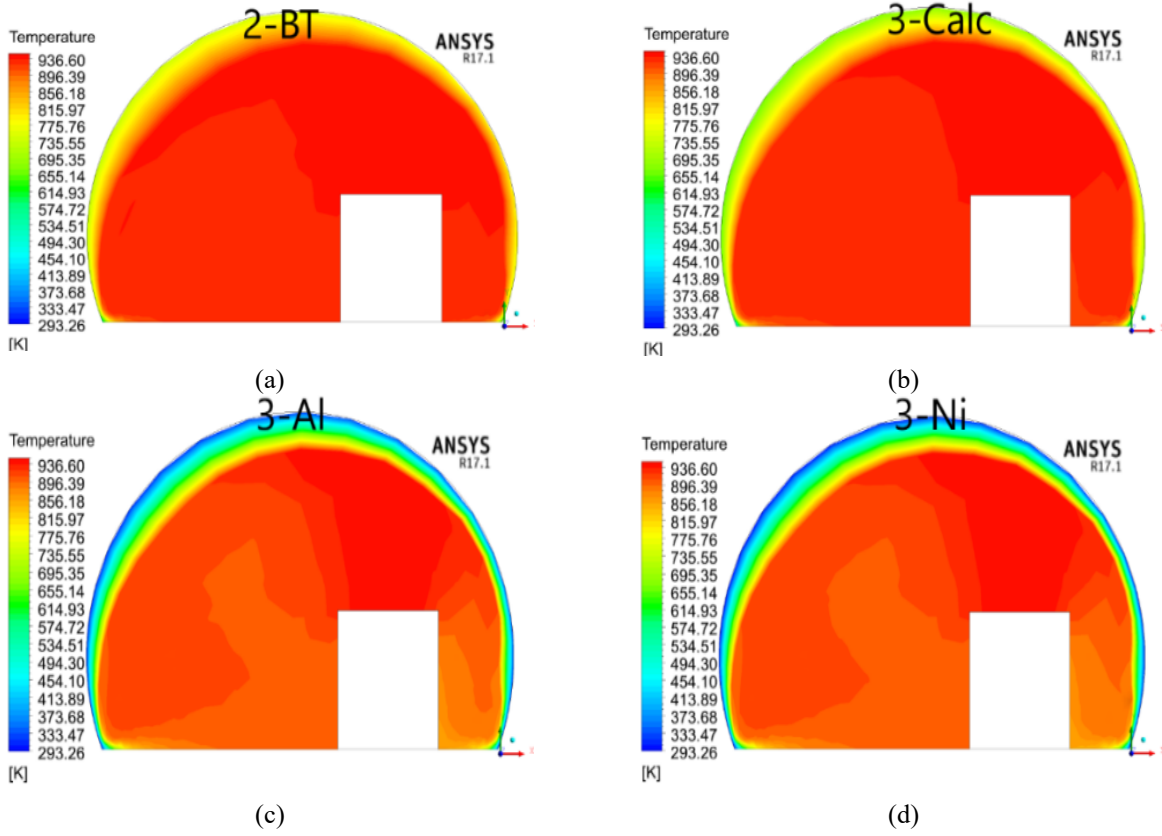
3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde iki tabakalı beton-toprak model ile üç tabakalı yapılara sahip tünel modellerinin iç yüzeylerindeki sıcaklık dağılımları incelenmiş ve üçüncü katman olarak

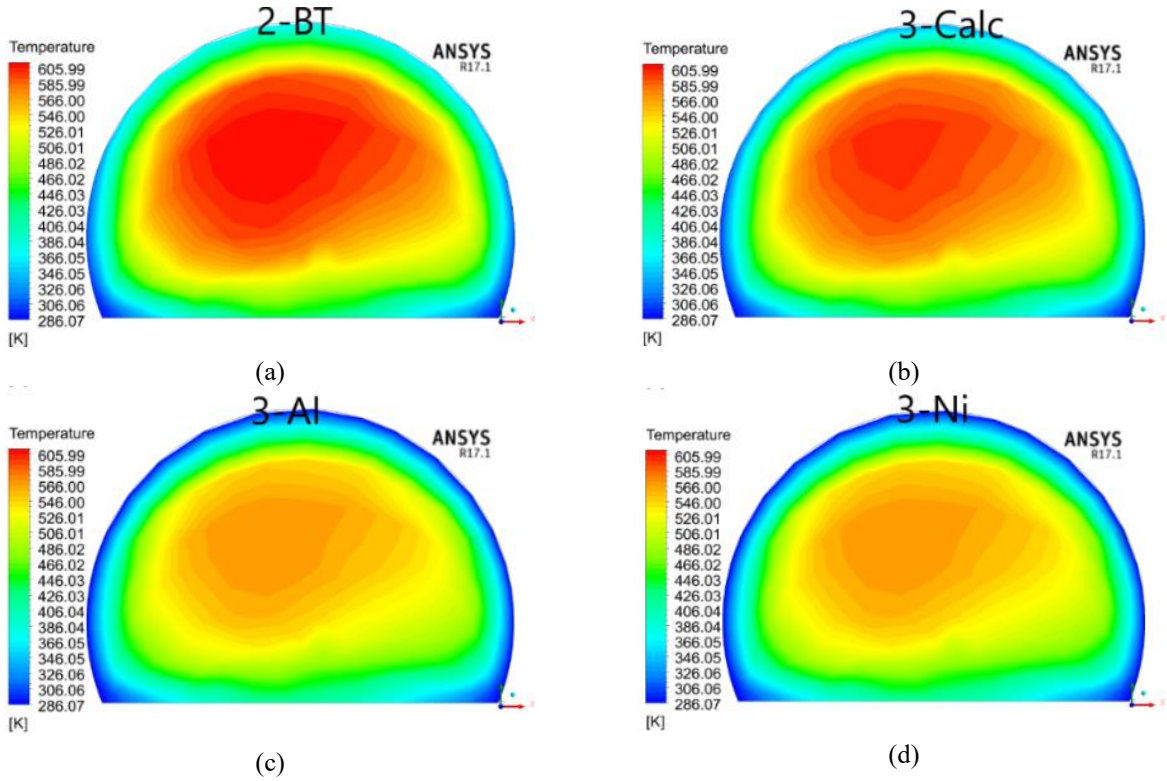
kullanılan malzemelere ait ısıl özelliklerin etkileri ortaya konmuştur. Analizler zamana bağlı olarak 300 s için yapılmıştır. Şekil 3 (a-d)' de tünel duvarının iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımları sırasıyla iki katmanlı ve üçüncü katman olarak Kalsiyum-silikat, Alüminyum ve Nikel uygulanan model için gösterilmiştir. İki ve üç katmanlı tüm tünel modellerinde, maksimum sıcaklıklar tünel duvarının yangın kaynağına en yakın iç yüzeylerinde oluşmuştur. Bu en yüksek sıcaklık değeri iki tabakalı modelde 806 K olarak elde edilirken, Kalsiyum-silikat, Alüminyum ve Nikel kaplı üç katmanlı modellerde sırasıyla 747 K, 341 K ve 320 K olarak tespit edilmiştir. Yangın kaynağından uzaklaştıkça yüzey sıcaklıkları düşmüştür. Al. ve Ni. duvar kaplaması kullanılan modellerde tünelin iç yüzeyinden daha fazla ısı transferi olduğundan, ortam sıcaklığı ve yüzey sıcaklığı düşmüştür. Ni. ile Al. malzemelerin ısı iletim katsayısı farklı olmasına rağmen analizlerde çok yakın sonuçlar elde edilmiş, bu iki malzemenin ısıl atalet değerlerinin çok yakın olması ile açıklanabilir. Ayrıca beton-toprak tabakanın ısıl depolama kapasitesi yüksek olduğundan ısıyı ortama hapsettiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar Saito ve Yamauchi [1]' nin çalışmalarında elde ettikleri sonuçlarla benzerlik göstermektedir.



Şekil 3. Tünel duvarının iç yüzeyindeki sıcaklık dağılımları: (a) iki katmanlı, (b) Kalsiyum-silikat, (c) Alüminyum ve (d) Nikel kaplı model



Şekil 4. Tünelin 2. metresinde x-y düzleminin sıcaklık dağılımları (a) iki katmanlı, (b) Kalsiyum-silikat, (c) Alüminyum ve (d) Nikel kaplı model

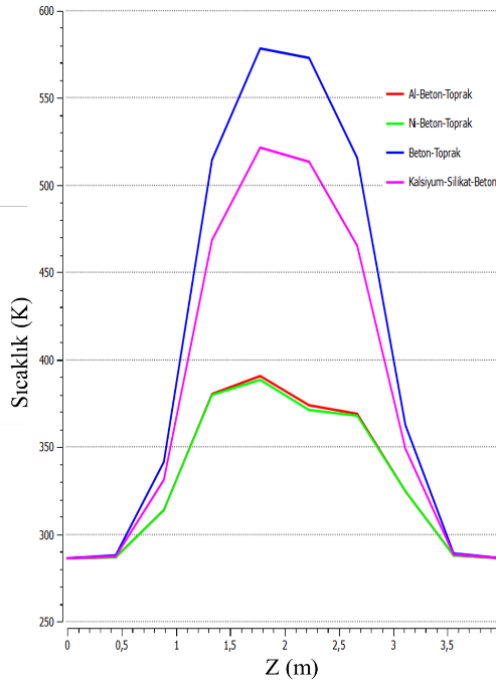


Şekil 5. Tünelin 3. metresinde x-y düzleminin sıcaklık dağılımları (a) iki katmanlı, (b) Calc., (c) Al. ve (d) Ni. kaplı model

Şekil 4 (a-d)' de tünelin yangın kaynağının bulunduğu 2. metresinde x-y düzleminin sıcaklık dağılımları sırasıyla iki katmanlı ve duvar kaplaması olarak Calc., Al. ve Ni. uygulanan modeller için gösterilmiştir. Tüm modellerde yangın kaynağından uzaklaştıkça sıcaklıkların azaldığı, Alüminyum ve Nikel kaplı üç tabakalı modellerde ise sıcaklık değişiminin daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Tavandaki sıcaklık Al ve Ni kaplı üç katmanlı modellerde ısı iletimi etkisiyle daha düşüktür. Bu duvar kaplamalarına sahip tünel tavanındaki sıcaklıklar 900 K'den 420 K'e hızlı bir düşüş gösterirken, iki tabakalı modelde sıcaklığın 780 K'e düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca Kalsiyum-silikat kaplı üç tabakalı tünelin iç sıcaklığı iki tabakalı tünelle benzer şekilde 740 K'e düşmüştür. Kalsiyum-silikat malzemenin ısı iletim katsayısı düşük olduğundan ısıyı iç ortama hapsedmiştir.

Şekil 5 (a-d)' de tünelin 3. metresinde x-y düzleminin sıcaklık dağılımları sırasıyla iki katmanlı ve üçüncü katman olarak Kalsiyum-silikat, Alüminyum ve Nikel uygulanan modeller için gösterilmiştir. İki tabakalı ve Kalsiyum-silikat kaplı üç katmanlı modelde tünel iç sıcaklığı 600 K civarında sabit kalırken, Nikel ve Alüminyum kullanılan üç tabakalı modelde daha düşük olduğu görülmüştür.

İki tabakalı ve Kalsiyum-silikat kaplı üç tabakalı modelde ısının içerde hapsediği ve iç sıcaklığın daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu iki modelde elde edilen iç bölge sıcaklıkları tünelin 2. metresindeki sıcaklıklardan daha düşüktür.



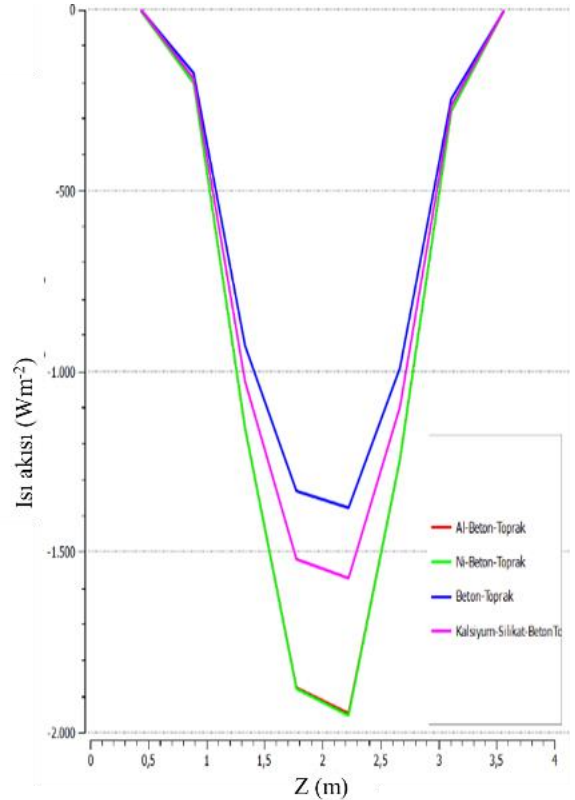
Şekil 6. Tüm modeller için tünel tavanının altında z eksenini boyunca sıcaklık değişimi

Yol tüneli tavanının hemen altındaki sıcaklığın tünel uzunluğu boyunca değişimi Şekil 6' da verilmiştir. Tünel tavanındaki en yüksek sıcaklık Alüminyum ve Nikel kaplı

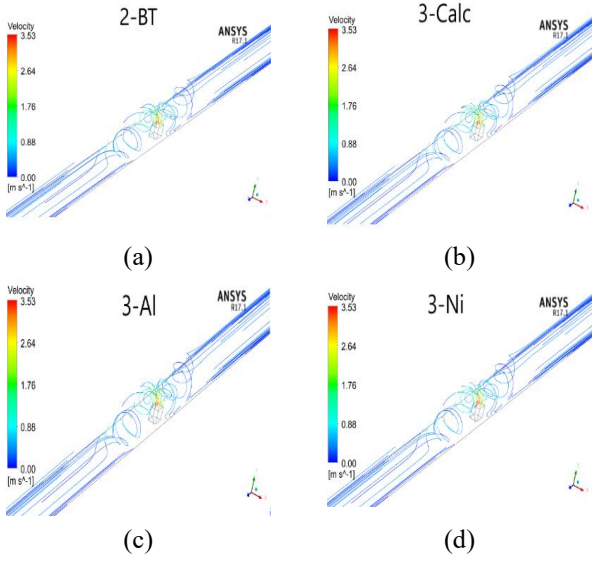
modellerde 390 K olarak elde edilirken, Kalsiyum-silikat kaplı tünelde bu değer 520 K olarak tespit edilmiştir. Kalsiyum-silikat kaplı modelde elde edilen bu değer Tomar vd. [4] çalışmalarında elde ettikleri sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Modeller içinde en yüksek sıcaklık değerlerinin izlendiği herhangi bir kaplamanın olmadığı beton-toprak modelde ise aynı noktadaki tavan sıcaklığının 600 K'e yaklaştığı görülmüştür.

Şekil 7' de iki katmanlı ve üçüncü katman olarak Calc., Al. ve Ni. uygulanan modeller için tünel tavanının hemen altındaki ısı akısının tünel uzunluğu boyunca değişimi verilmiştir. Isı akısının tünelin girişinde tüm modeller için çok yakın değerler aldığı, yangın kaynağına yakın bölgelerde artarak değiştiği ve yangın kaynağından uzaklaştıkça yine her modelde benzer değerler aldığı görülmüştür. Yol tünelinin tavanı altındaki ısı akısının en yüksek değeri daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olan Alüminyum ve Nikel tabakalarda 1950 W/m² olarak elde edilmiştir. Beton-toprak tünelde, bu iki modele oranla % 26 daha düşük ısı akısı belirlenirken, Kalsiyum-silikat kaplı tünelde ise % 15 daha düşük ısı akısı ortaya çıkmıştır.

Şekil 8 (a-d)' de iki katmanlı Calc., Al. ve Ni. kaplı yol tüneli modellerinde tünel içerisindeki sıcak gazın hız dağılımları sırasıyla verilmiştir. Her model için hız değişimlerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Yangın kaynağına yakın bölgelerde vorteksler oluştururken, tünel portallarına yakın bölgelerde daha düzgün bir akış görülmüştür.



Şekil 7. Tüm modeller için tünel tavanının altında z eksenini boyunca ısı akısı değişimi



Şekil 8. Tünel içindeki sıcak gazın hız değişimi: (a) iki katmanlı, (b) Calc., (c) Al. ve (d) Ni. kaplı model

4 Sonuçlar

Bu çalışmada toprak-beton olmak üzere iki tabakadan oluşan 1:100 ölçeğinde yol tüneli modeline, üçüncü bir katman olarak Alüminyum, Nikel ve Kalsiyum-silikat tabakaları uygulanarak ısı etkiler sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Yol tüneli yangınlarında tünel içi ve yüzeylerindeki sıcaklık dağılımının toprak-beton tünelin üzerine eklenecek üçüncü bir kaplama malzemesinden etkilendiği görülmüştür.
- Sıcaklık dağılımı üzerinde en etkin parametrenin ısı atalet olduğu, bununla birlikte kaplama malzemesinin ısı iletim katsayısı ve ısı depolama kapasitesinin de önemli olduğu tespit edilmiştir.
- Üçüncü katman olarak Al. ve Ni. tabaka kullanılan modellerde ısı transferi iki katmanlı modele göre daha fazla iken, Kalsiyum-silikat tabakası kullanılan modelde farkın çok az olduğu tespit edilmiştir.
- Ni ve Al kaplı tünel modellerinde yapılan analizlerde yakın sonuçlar elde edilirken, Kalsiyum-silikat kaplı modelin iki katmanlı modelle benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Tünel iç yüzeyindeki en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri 351 K ve 806 K olarak sırasıyla Ni. kaplı üç tabakalı ve beton-toprak iki tabakalı modelde görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

- [1] S. Saito and Y. Yamauchi, Numerical study of the influence of tunnel wall properties on ceiling jet. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 110,

103811. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104087>.
- [2] T. Xu, D. Zhao, H. Tao and P. Lei, Extended CFD models for numerical simulation of tunnel fire under natural ventilation: Comparative analysis and experimental verification. Case Studies in Thermal Engineering, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101815>.
- [3] M.G. Vega, M.A. Diaz, J. M. Oro, R.B. Tajadura and C. S. Morros, Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 539-551, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.10.001>.
- [4] M.S. Tomar, S. Khurana and S. Chowdhury, A numerical method for studying the effect of calcium silicate lining on road tunnel fires. Thermal Science and Engineering Progress, 43, 2022. [doi:10.1016/j.tsep.2022.101245](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101245).
- [5] Y. Gao, G. Zhu, S. Gu and H. Zhu, Experimental investigation on longitudinal and transverse temperature distribution in a horseshoe shaped tunnel fire. Advances in Structural Engineering, 2089-2096, 2019. <https://doi.org/10.1177/1369433219831485>.
- [6] F. Wang and M. Wang, A computational study on effects of fire location on smoke movement in a road tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 51, 405-413, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.09.008>.
- [7] J. Modic, Fire simulation in road tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00069-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00069-5).
- [8] T. Wei, W. Zhao and R. Zong, Analytical study of wall factor on the ceiling temperature distribution in the far field for tunnel fires. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 171, 196-201, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.018>.
- [9] C. Caliendo and G. Genovese and I. Russo, Risk analysis of Road Tunnels: A computational fluid dynamic model for assessing the effects of natural ventilation. Appl. Science 11, 32, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11010032>.
- [10] A. Hearter, Fire Tests in the Ofenegg-Tunnel in 1965. Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, Sweden National Testing and Research Institute, 195-214, 1994.
- [11] A. Haack, Introduction to The EUREKA EU 499 Firetune project. Proceedings of the International Conference on Fire in Tunnels, Sweden National Testing and Research Institute, 3-19, 1994.
- [12] H. Ingason, Fire Testing in Road and Railway Tunnels. Flammability testing of materials used in construction, transport and mining, 231-274, Woodhead Publishing, 2006. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102801-8.00011-9>.
- [13] Udey, ANSYS Fluent - CFD Analiz Mühendisi Yetiştirme Eğitimi, 2021.





Surface coating of stainless steels by HVOF method and investigation of wear properties

HVOF yöntemi ile paslanmaz çeliklerin yüzeylerin kaplanması ve aşınma özelliklerinin incelenmesi

Yıldız Yaralı Özbek^{1,*} , Batuhan Özer² 

^{1,2} Sakarya University, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 54187, Sakarya, Türkiye

Abstract

The surfaces of 316L stainless steels, which are frequently used in the industry due to their mechanical properties, were coated with HVOF method in order to improve their properties. Two different powders for steel surfaces; Diamalloy 2002 (Tungsten Carbide, chromium based) and Metco 7202 (chromium based) powders were prepared in different concentrations. Group A specimens were coated with a mixture of 50% Diamalloy 2002 and 50% Sulzer Metco and Group B specimens were coated with a mixture of 100% Sulzer Metco 7202 by HVOF method. These powders produce coatings that provide wear resistance due to their content. The surface properties of the coated samples were analysed by some methods. Optical and SEM images of all samples were taken and XRD analyses were performed. The coating layer is clearly visible. Some porosity formation was observed. Microhardness values were measured. As a result of hardness measurements, it was determined that the surface hardness increased 4-7 times with the coating. Linear abrasion tests were performed with CSM abrasion tester. It was observed that the abrasion resistance increased. After the abrasion test, roughness measurements and SEM-EDS analyses of the abraded surfaces were performed. Abrasive and adhesive wear formations are present on the worn surfaces.

Keywords: HVOF, 316 stainless steel, Surface coating, Mechanic properties, Wear

1 Introduction

Surface coating methods have become very popular and application areas have increased in recent years thanks to the financial, theoretical and technological benefits they provide [1-2]. The surface coating process aims to improve the surface of the material, improve its appearance, and make it resistant to the conditions in its environment as a result of precipitation of an element suitable for the material on the surface of the material. In surface technology, in some cases, obtaining the desired material is only possible thanks to coating technologies [2-6]. It is a surface coating method that aims to improve the surface of the coating material by examining its wear, corrosion and fatigue strength, to increase its advantages and to repair the materials in need of repair [7-13].

Öz

Endüstride mekanik özellikleri sebebi ile sıklıkla kullanılan 316L paslanmaz çeliklerin yüzeyleri, özelliklerini iyileştirme amacıyla HVOF yöntemi kaplanmıştır. Çelik yüzeyleri için iki farklı toz; Diamalloy 2002 (Tungsten Karbür, krom esaslı) ve Metco 7202 (krom esaslı) tozları farklı konsantrasyonlarda hazırlanmıştır. A grup numuneler ; %50 Diamalloy 2002 ve %50 Sulzer Metco karışımı ile B grup numuneler ise %100 Sulzer Metco 7202 karışımı ile HVOF yöntemi yardımıyla kaplanmıştır. Bu tozlar içerikleri nedeni ile aşınma dayanımı kazandıran kaplamalar üretmektedirler. Kaplanmış numunelerin yüzey özellikleri bazı yöntemler ile analiz edilmiştir. Tüm numunelerin optik ve SEM görüntüleri alınmış ve XRD analizleri yapılmıştır. Kaplama tabakası net şekilde görülmektedir. Azda olsa bazı porozite oluşumları görülmüştür. Mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri sonucunda kaplama ile yüzey sertliğinin 5-7 kat arttığı belirlenmiştir. CSM aşınma test cihazı ile lineer aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma dayanımlarının arttığı görülmüştür. Aşınma testi sonrası aşınan yüzeylerin pürüzlülük ölçümleri ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Aşınan yüzeylerde abrasif ve adhesiv aşınma oluşumları mevcuttur.

Anahtar kelimeler: HVOF, 316L paslanmaz çelik, Yüzey kaplama, Mekanik özellikler, Aşınma

Thermal sprayed process is a demanding technique used for obtaining the coatings due to easy processability, reasonable material cost and good mechanical properties [9-15].

The coating can contribute to better hardness, excellent wear. These sprayed coatings consist of hard phase particles dispersed into the substrate material [16-19]. The coating material is first heated to molten or semi-molten state, then is injected to the substrate with a high speed, finally forming an coating area on the surface. The coating quality has a significant relationship with the sprayed parameters and deposited material properties [20-24]. Tungsten based powder is still the most popular and commercial composition by far. Chao Zheng et al have worked tribology's properties of HVOF coating. They have found e maximum

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yyarali@sakarya.edu.tr (Y. Y. Özbek)

Geliş / Recieved: 08.05.2023 Kabul / Accepted: 12.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1294169

microhardness of coating was about 1120 HV which has been increased about 3-fold of the substrate. The presence of hard phase was improvement of microhardness values. Geng Z. and friends found that tungsten-based coatings improve the wear resistance of the surface [20-21].

High velocity oxy-fuel (HVOF) improve the wear resistance and decrease the friction coefficient between various sliding components in automotive, aeronautical and space.

The high velocity oxy-fuel (HVOF) process can be used to achieve relatively low particle temperature and high speed (900 m/s). Thus, dense coatings with low porosity and less prone to oxidation can be obtained [10].

The HVOF sprayed WC-based cermet hard coatings such as WC-Co, WC-CoCr and others are applied in different engineering applications due to wear resistance and good corrosion resistance. Cobalt acts as a tough binder, which deforms plastically on impact onto the substrate and accommodates the wear-resistant WC particles [14].

Experimental studies were carried out after coating with HVOF and their findings were evaluated. Mixing 50% Diamalloy 2002 and 50% Sulzer Metco 7202 powders to A group samples, and 100% Sulzer Metco 7202 powder to B group samples using 316 stainless steel HVOF was applied to the steel base. Wear test was applied to surface.

2 Material and method

In this experimental study, AISI 316 L stainless steel was used as the substrate and HVOF coating method was applied on the selected steel samples.

The coatings were made on the surface of 316 stainless steel by using various powders by HVOF method. The surfaces were examined with a performed for elemental analysis in Table 1.

In the HVOF coating process, 316L stainless steel with dimensions of 100 x 100 x 4 mm was used as the substrate in this parameter. AISI 316 stainless steel has been sandblasted for this is to increase the efficiency of the coating to be made on the steel material.

The coatings were made on the surface of 316 stainless steel by using various powders by HVOF method percentages of powders to be coated are given in Table 2 and Table 3.

Two different powders were used in this study. The first powder is Diamalloy 2002 powder and the other powder is Sulzer Metco 7202 powder. The A samples are including; %50 Sulzer Metco Diamalloy 2002 powders (WC12Co) + %50 Sulzer Metco 7202(25NiCr-Cr3Cu2). In order to examine the effect of the number of passes in the experiments, different pass numbers were used. The parameters of the samples obtained with B group 100% Sulzer Metco powders are 1.5 bar nitrogen pressure, 2 cm length and 10 seconds time. The number of passes applied to these samples varies. The process parameters are given in Table 4. The changes in the surface properties as a result of the coating were investigated.

Table 1. Chemical analysis results of stainless steel

Steel Type	% Weight (wt%)							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI 316L	0.08	2.0	0.045	0.03	0.75	18 -	11 -	2.0
	max	max	max	max	max	max	max	max
	0.039	1.811	0.032	0.005	0.670	16.539	10.25	1.887

Table 2. Powders of HVOF process

Classification	Tungsten Carbide, Chrome Based (2002) (WC 12Co)	Carbide, Chrome Based (7202)
Chemical Structure	33Ni9Cr3.5Fe2Si2B0.5C	25NiCr-Cr3Cu2
Chemical Structure	Agglomeration	Agglomeration, Sintering
Morphology	Spherical	Spherical
Purpose	Abrasion resistance, corrosion resistance	Abrasion resistance, corrosion resistance
Particle size	+45, +11	-106, +45
Service temperatur	≤ 540°C	≤ 870°C
Apparent Density	2-2,5g/cm3	2.1-3 g/cm ³

Table 3. The powder groups of HVOF coating process

	Powder -1 (A)	Powder-2 (B)
Chemical Composition Grain Size	%50 Sulzer Metco Diamalloy 2002 powders	%100 Sulzer Metco 7202 powders
	((WC12Co)33Ni9Cr3.5Fe2Si2B0.5C)	(25NiCr-Cr3Cu2)
	+%50 Sulzer Metco 7202(25NiCr-Cr3Cu2)	
	-45 +11 µm	-106 +45 µm

Table 4. Process parameters of HVOF treatment

Samples	Passes	Parameters
A1	15	Shrouded 400 mm
A2	10	O2 150
A3	6	H2 300
B1	15	Gas 10 (H2)
B2	10	Disk %15
B3	6	Speed (mm/sn) 300 mm/s
		Spray Gun Distance 20 mm
		Passes 5

Coating thicknesses were measured and their effects on hardness and wear were examined. Before the wear test on the coating surfaces and optic images were taken. Coating structure was investigated with macro and micro-examined images. X-ray analyzes were made and the phases in the structure were determined.

Surface roughness was checked, trace width after wear test the wear rates were determined by measuring the wear surfaces. Changes in surfaces according to images and EDS analyzes interpreted. Improving the wear properties with the coatings applied to the surface, wear tests were applied to the samples with different speeds, paths, loads and number of passes. The effects on the coating were investigated. SEM and EDS analyses were applied to worn surface.

3 Results

As can be seen from the coating images in Figure 1, there are occasional porosity formations. Powder particles, for which a small amount of melting cannot be efficient, are rarely seen. It can be said that the coating is successfully

bonded to the sandblasted stainless steel surface. The sample with 15 passes is called A1, the sample with 10 passes is called A2, and the sample with 6 passes is called A3. The number of passes applied to these samples varies. The parameters of the samples obtained with B group 100% Sulzer Metco 7202 powder. The number of passes applied to these samples varies. The sample applied 15 passes was called B1, the sample applied 10 passes was called B2, and the sample applied 6 passes was called B3 sample. The passes were affected to thickness of coating layer. In the HVOF process, the amount of molten powder coming to the surface will increase with the increase in the number of passes, which causes the coating thickness to change. The variation of coating thicknesses according to the parameters is clearly seen in Figure 2.

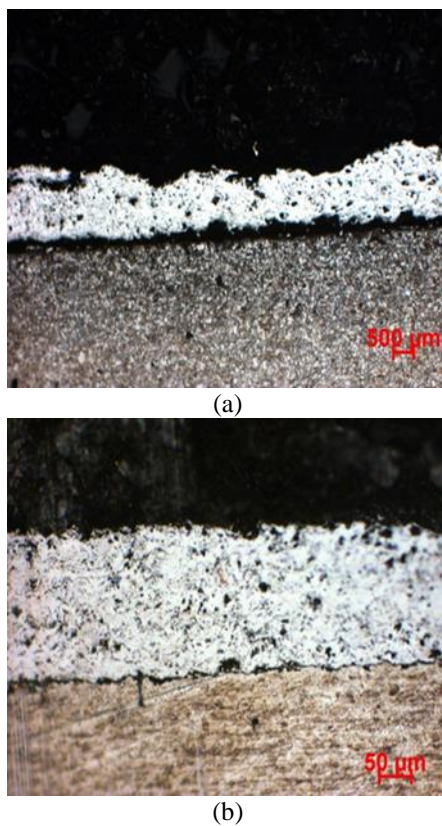


Figure 1. Optical microscope image of the A1 and B1 group samples



Figure 2. The coating thickness of coated sample by HVOF

Coating section of coated sample SEM images of A and B samples are given in Figure 3. When the coating images are analyzed, the presence of small amounts of porosity is seen from time to time. Due to the structure contained in HVOF coatings, porosities can be observed.

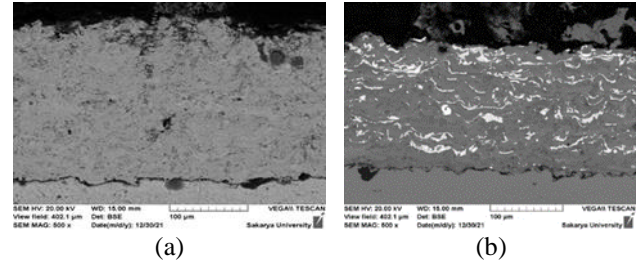


Figure 3. (a) SEM image of A3 sample, (b) B3

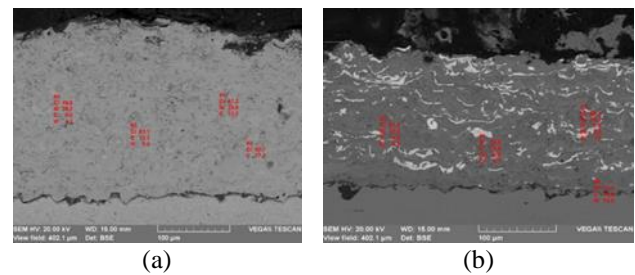


Figure 4. (a) EDS image of A3 sample, (b) B3

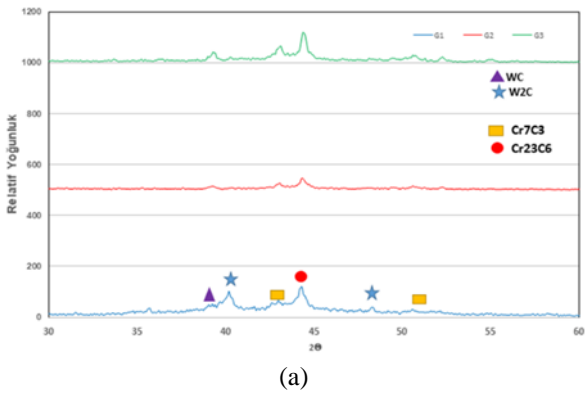
SEM image of A3 sample is given in Figure 3a. When we examine the A3 sample, it is clearly seen that the coating layer contains porosity. Adhesion is not very good. It cannot be said that the coating thickness is homogeneously distributed [15-18]. SEM image of B1 sample is given in Figure 3b. According to this image, it is seen that there is no good adhesion between the coating surface and its interface. Porous structures may have formed on the sample surface due to the preparations before coating. Since a good coating means a good interface, such results can be obtained when the surface preparation processes are not well prepared before coating [17-20].

EDS analyses of the A3 sample are given in Figure 4a. When these images are examined, it has been observed that the chromium element exists at different weights in different regions. In the image of the sample, the porosity is very low and a dense coating layer is seen. In the part marked with number 1, chromium element is more (47.2%) by weight. Nickel element was also observed in this region at a rate of 39.6% by weight. When we examine the 2nd and 3rd regions, 83.1% and 82.7% of the chromium elements are observed in these regions.

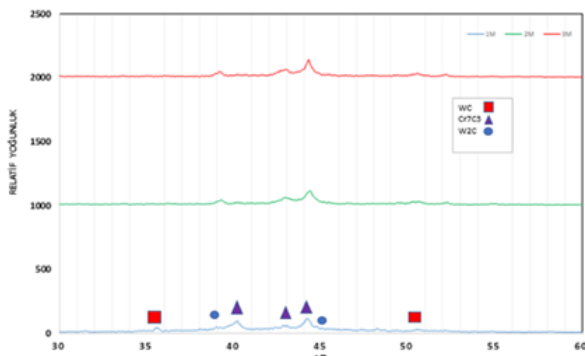
EDS analysis of B1 sample is given in Figure 4b. When looking at the image, it is understood that the distribution of Tungsten element is homogeneous. “W” element by weight (79.9%) was observed in the region marked with number 1. The other element with the highest weight is carbon. This marked and imaged region has a white structure. In the area marked with number 2, the element with the highest weight is chromium. Chromium penetrated the structure intensively in this region (67.5%). Nickel and carbon elements follow chromium in density. The region is dark in color. When we

examine the region marked with number 3, it is observed that it is the region with the most elements. The highest element by weight is nickel with a ratio of 64.1%.

XRD analysis results of A and B samples taken from these coated surfaces are given in Figure 5.



(a)



(b)

Figure 5. The XRD results of (a)A1-A2-A3 and (b) B1-B2-B3 Samples

When XRD analyzes of samples were examined, WC, W₂C, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆ phases were found in A and B samples. Cr₂₃C₆ phase is also seen in M sample. When the A sample was examined, it was observed that the Cr₂₃C₆ phase was intense at the 45° 2θ angle. The presence of W₂C phases is observed at the angle of 40° and 48°. In the study of Zheng et al., the powders stored during the thermal spray process meet with oxygen at high temperature and cause chemical change [20,23]. The WC phase is available at an angle of 38°. When the G samples are examined, there are Cr₇C₃ phases at the angle of 40°-43° and 45°. It is seen that the WC peak intensity is intense at 35° and 50° angles. The formation of hard phase contents is present in both samples. Changes in these peak rates are important changes that can be a factor in mechanical properties.

The hardness values of the samples coated with the HVOF method and made with powder mixtures are given in Figure 6. The hardness values were taken from three different places with a microhardness device on the surfaces coated by using the thermal spray method, and the hardness values were recorded by calculating the averages of these values. When the samples are examined, hardness increases

due to newly formed phases are observed. When the hardness values obtained after the coating process were compared with the hardness values obtained before coating, it was determined that the 5-7-fold coating process increased the hardness [20-22].

Chao Zheng et al. increased the hardness by a factor of 5 with HVOF, but in this study, the hardness increased more with parametric change [19,20].

Wuxi Zhou et al. also produced similar coatings and they were able to increase the hardness by 5-6 times. They also improved the mechanical properties, but the mechanical values are slightly higher in our study. this may be due to the advanced HVOF device and the high speed of the device, i.e. parametric [21,23].

Dense and hard phases formed on the surface significantly increased the hardness values. The hardness of the stainless steel used as a substrate in the coating process is 200 HV.

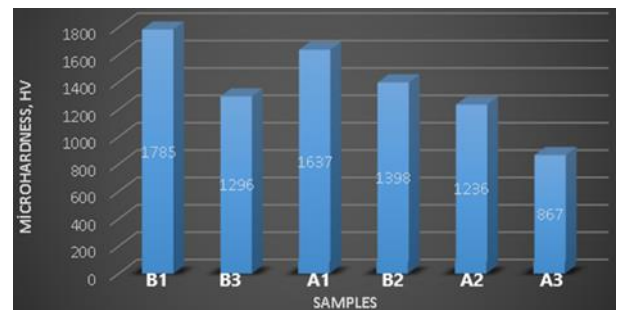


Figure 6. The Microhardness results of samples

Wear test results; In wear applications, 200 m distances were carried out at 0.4 m/s speeds, and the load was 3N and 5N. The parameters applied in the wear tests are shown in Table 5. After the wear tests, the wear track widths were examined with an optical microscope. Wear velocity strengths were calculated with the results. After the wear is done, the friction coefficients data are taken from the software in the wear device. Detailed explanation of samples test parameters is shown in Table 5.

Table 5. Parameters used in the wear process

Powders	1. Load (N)	2. Velocity (m/s)	3. Road (m)
A	3N-5N	0.4	200
B	3N-5N	0.4	200

In order to analyze the trace widths formed on the coating surfaces as a result of the tests obtained from the powder mixture A and the powder mixture B, different wear tests were carried out on the samples belonging to both groups. An experimental system was designed to examine the wear behavior of the materials coated with HVOF for velocity, load and path changes [21].

When the wear results of the samples obtained with the mixture of 50% Diamalloy 2002 + 50% Sulzer Metco 7202

powders are examined. The highest trace width is B sample group. It was detected at a speed of 0.4 cm/sec at 200 meters under a load of 1190 μm 3N. The highest trace width belonging to the A sample group belongs to the A1 (585 μm). The average of the trace widths of the A group samples was calculated as 475 μm . This value was recorded as 811 μm when the average of the B group samples was taken. It was observed at a distance of 200 meters under a 5N load and at a speed of 0.4 cm/sec. The lowest wear rate belongs to the A1 sample. It has been observed that the coefficient of friction increases when the number of passes at the same speed at the same distance is reduced [20-21].

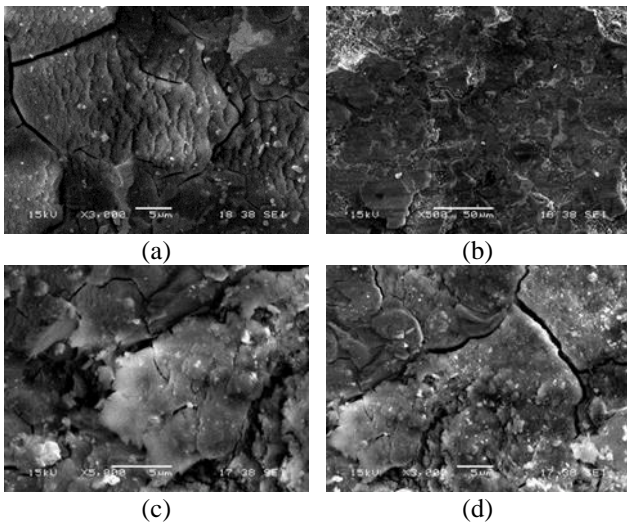


Figure 7. The SEM of worn surface of A samples after wear test. (a)A1 samples; 3N-0.4m/sn-200m, (b) A3 samples; 3N-0.4m/sn-200m, (c) A1 samples; 5N-0.4m/sn-200m, (d) A3 samples; 5N-0.4m/sn-200m

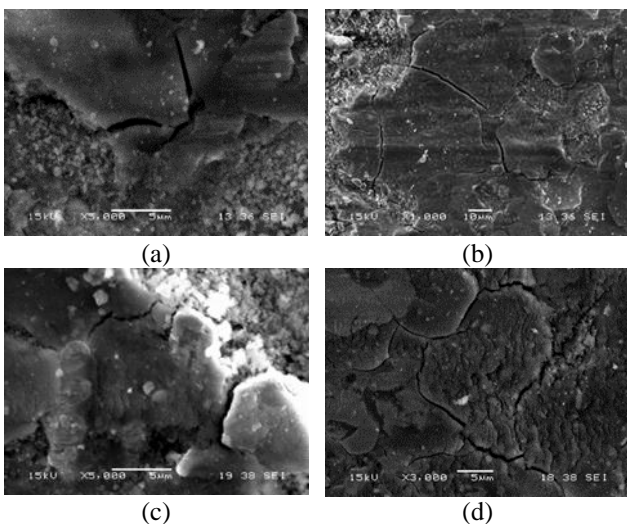
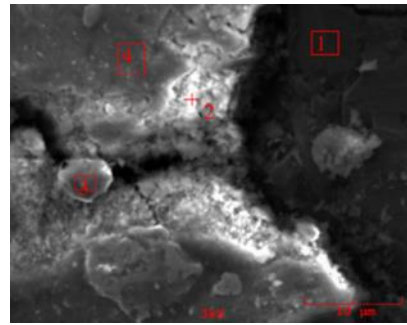


Figure 8. The SEM of worn surface of B1 samples after wear test. (a) B1 samples; 3N-0.4m/sn-200m, (b) B1 samples; 3N-0.4m/sn-200m, (c) B1 samples; 5N-0.4m/sn-200m, (d) B3 samples; 5N-0.4m/sn-200m

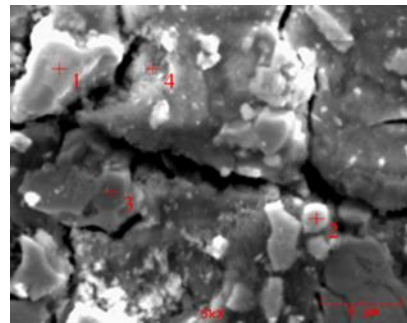
When the SEM images of A and B group samples are examined (Figure 7-9) after the wear tests, the presence of

porosity, crack formations, and surface ruptures are observed. The fact that this powder mixture is a little harder has made this situation common. In these samples, for which wear tests were carried out, when the load is increased, the depths of the cracks are observed, and when the distance to the road is increased, fatigue wear behaviors are observed in places. When coating is made from 100% pure powder, homogeneity is achieved and smoother surfaces are formed compared to mixed powder coatings [22-23].



Element, %wt	1	2	3	4
C	1.766	3.154	2.112	1.194
O	7.629	22.991	12.779	38.113
Al	0.134	2.083	0.481	2.095
Si	0.000	0.000	0.057	0.000
Cr	69.629	41.998	52.307	45.304
Co	0.291	0.279	0.719	0.344
Ni	19.257	10.107	29.170	10.848
W	1.294	20.389	2.375	2.101

Figure 9. The EDS analyses of A1 samples load 4N, velocity 0,4 m/sn, distance 200 m



Element, %wt	1	2	3	4
C	3.175	3.542	5.821	0.243
O	6.490	11.034	6.759	34.311
Al	0.086	0.182	0.008	0.987
Cr	56.405	67.056	80.703	47.667
Co	0.315	0.534	0.163	0.331
Ni	29.855	16.620	0.601	12.140
W	3.673	1.032	5.946	4.321

Figure 10. The EDS analyses of A1 samples load 4N, velocity 0,4 m/sn, distance 200 m

Figure 9 and Figure 10 gives us EDS analyses of A and B group samples after wear test. EDS analyzes taken from the surface after wear show wear products. Since the A and

B groups have different contents, different elements are seen in the EDS analyzes taken from the surface. The presence of Cr element was observed in the light colored region [23].

4 Conclusion

The different powders are used for HVOF coating such as the 50% Diamalloy 2002 and 50% Sulzer Metco 7202 powder. The process parameters were changed in coating process.

The coating thickness of A sample is measured as 213 µm. The layer thickness of B sample is 232 µm. The fact that the samples coated with the same parameters have different coating thicknesses can be associated with powder composition ratios. This is due to the difference in the structure and dimensions of the mixture powders and the homogeneous non-melting situation.

In some cases, it may also occur due to the device used in the experiment phase. WC, W₂C, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆ phases were found in the X-ray analyzes of the samples after coating. Cr₂₃C₆ phase was also formed in 100% 7202 powder mixture. In both samples, the hard phase WC and W₂C phases emerged. These hard phases improved the mechanical properties (wear and hardness) of the coating surface. The hardness value increased approximately in the range of 5-8 times.

In a short time, the surfaces of the steels coated with the HVOF spraying method can be improved and used advantageously in industrial and economic pain. It was found that the number of passes and the wear rates were generally inversely proportional. Wear properties of B group samples better than A samples. In general, the abrasion resistance improved 2-3 times and the abrasion rate decreased.

The powders content is important for mechanical properties. The coating parameters are very important all surface properties.

The wear resistance of AISI 316 stainless steels, which were coated with the HVOF spraying method, was increased and their mechanical properties were improved.

Conflict of interest

This article is an original work. It was produced from the graduate study of a student named Batuhan Özer. Yıldız Yaralı Özbek provided consultancy and also took part in experimental studies. The article was prepared and edited by Yıldız Yaralı Özbek. There is no conflict between the authors.

Similarity rate (iThenticate): %13

References

- [1] G. Bolelli, A. Colellab, L. Lusvarghia, P. Puddua, R. Rigond, P. Sassatella and V. Testaa, Properties of HVOF-sprayed TiC-FeCrAl coatings, *Wear*, 418, 36–51, 2019. [https://doi: 10.1016/J.WEAR.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2018.11.002).
- [2] H. Adarsha, C.S. Ramesh, N. Nair, K. M. Karisiddeshwaraswamy and A. Chaturvedi, Investigations on the Abrasive Wear Behaviour of Molybdenum Coating on SS304 and A36 using HVOF Technique, *Materials Today: Proceedings*, 11, 25667–25676, 2018. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2018.11.008](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.008).
- [3] G.Y. Koga, Corrosion and wear properties of FeCrMnCoSi HVOF coatings, *Surface Coatings Technology*, 357, 993–1003, 2019. [https://doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.10.101](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.101).
- [4] W.J. Cheong, B.L. Luan and D.W. Shoemith, Protective coating on Mg AZ91D alloy – The effect of electroless nickel (EN) bath stabilizers on corrosion behaviour of Ni–P deposit, *Corrosion Science*, 49, 1777–1798, 2007. [https://doi: 10.1016/J.CORSCI.2006.08.025](https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2006.08.025).
- [5] D. Kalliopi and K. Aligizaki, Anti-Corrosion Methods of Materials, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, 51, 279–283, 2004. [https://doi: 10.1108/acmm.2004.12851aee.001](https://doi.org/10.1108/acmm.2004.12851aee.001).
- [6] L. Yu, W. Huang and X. Zhao, Preparation and characterization of Ni-P-nanoTiN electroless composite coatings, *J. Alloys Compounds*, 50, 4154–4159, 2011. [https://doi: 10.1016/J.JALLCOM.2011.01.025](https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2011.01.025).
- [7] E. Sevgi ve O. Çulha, Isıl İşlem Şartlarının Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23, 1033–1048, 2021. [https://doi: 10.21205/DEUFMD.2021236929](https://doi.org/10.21205/DEUFMD.2021236929).
- [8] A. Billard, F. Maury, P. Aubry, F. Balbaud-Célérier, B. Bernard, F. Lomello, H. Maskrot, E. Meillot, A. Michau and F. Schuster, Emerging processes for metallurgical coatings and thin films, *Comptes Rendus Physique*, 19, 755–768, 2018. [https://doi: 10.1016/J.CRHY.2018.10.005](https://doi.org/10.1016/J.CRHY.2018.10.005).
- [9] H. Omidvar, M. Sajjadnejad, G. Stremmsdoerfer, Y. Meas and A. Mozaari, Manufacturing Ternary Alloy NiBP-PTFE Composite Coatings by Dynamic Chemical Plating Process, *Materials and Manufacturing Processes*, 6, 31–36, 2016. [https://doi: 10.1080/10426914.2014.994753](https://doi.org/10.1080/10426914.2014.994753).
- [10] Y. Wang, H. Wang, Z. Zhao, C. Hou, X. Liu and X. Song, *Surface and Coatings Technology*, 473, 25-30, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.12998>
- [11] M.R. Ramesh, S. Prakash, S.K. Nath, P.K. Sapra and N. Krishnamurthy, Evaluation of thermocyclic oxidation behavior of HVOF-sprayed NiCrFeSiB coatings on boiler tube steels, *Journal of Thermal Spray Technology*, 20, 992–1000, 2011. [https://doi: 10.1007/S11666-010-9605-X/FIGURES/12](https://doi.org/10.1007/S11666-010-9605-X/FIGURES/12).
- [12] J.A. Picas, S.E. Menargues and M.M.T. Baile, Cobalt free metallic binders for HVOF thermal sprayed wear resistant coatings, *Surface and Coating Technology*, 20, 456, 2023. [https://doi:10.1016/j.surfcoat.2023.129243](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129243)
- [13] Ö.A. Kaya, K. Çakır ve Y. Bozkurt, Plazma Püskürtme Yöntemiyle Çelik Levha Üzerine Farklı Alaşımın Kaplanması, *International Journal of Engineering Research and Development*, 9, 3-6, 2017. [https://doi: 10.29137/umagd.372934](https://doi.org/10.29137/umagd.372934)
- [14] Z.E. Erkmen, The Effect of Heat Treatment on the Morphology of D-Gun Sprayed Hydroxyapatite Coatings, *Journal of Biomedical Materials Research*, 361-368, 1999. [https://doi: 10.1002/\(SICI\)1097-4636\(1999\)48:6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4636(1999)48:6).

- [15] J.A. Picas, S. Menargues, E. Martin and M.T. Baile, Cobalt free metallic binders for HVOF thermal sprayed wear resistant coatings *Surface & Coatings Technology* 456, 129243, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129243>
- [16] Sulzer, Surface engineering and thermal spraying. <https://www.sulzer.com/en/shared/services/surface-engineering-and-thermal-spraying>, Accessed 25 September 2023.
- [17] C. Zheng, Y. Liu, J. Qin, C. Chen and R. Ji, Wear behavior of HVOF sprayed WC coating under water-in-oil fracturing fluid condition, *Tribology International*, 115, 28–34, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.002>
- [18] W. Zhoua, K.Zhoua, Y. Li, C. Denge and K. Zenge, High temperature wear performance of HVOF-sprayed Cr₃C₂-WC-NiCoCrMo and Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings, *Applied Surface Science*, 416, 33–4, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.132>
- [19] M. Oksa, E. Turunen, T. Suhonen, T. Varis and S.P. Hannula, Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications, *MDPI Coatings*, 1, 17-52, 2011. <https://doi.org/10.3390/coatings1010017>
- [20] S. Hong, Y. Wu, B. Wang and J. Lin, Improvement in Tribological Properties of Cr₁₂MoV Cold Work Die Steel by HVOF Sprayed WC-CoCr Cermet Coatings, *MDPI Coatings*, 29, 3-12, 2019. [https://doi: 10.3390/coatings9120825](https://doi.org/10.3390/coatings9120825).
- [21] A. C. Karaoglanli, M. Oge, K. M. Doleker and M. Hotamis, Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition, *Surface Coatings Technology*, 318, 299–308, 2017. [https:// doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.02.021](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.021).
- [22] Z.B. Zheng, Y.G. Zheng, W.H. Sun and J.Q. Wang, Erosion–corrosion of HVOF-sprayed Fe-based amorphous metallic coating under impingement by a sand-containing NaCl solution, *Corrosion Science*, 76, 337–347, 2013. [https://doi: 10.1016/J.corsci.2013.07.006](https://doi.org/10.1016/J.corsci.2013.07.006).
- [23] S. Hong, Y. Wu, G. Li, B. Wang, W. Gao and G. Ying, Microstructural characteristics of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed nickel-based alloy coating, *Journal of Alloys and Compounds*, 581, 398–403, 2013. [https:// doi: 10.1016/J.jallcom.2013.07.109](https://doi.org/10.1016/J.jallcom.2013.07.109).





Nohut proteininin ultrases destekli özütlenmesinin optimizasyonu ve teknolojik özellikleri

Optimization of ultrasound-assisted extraction of chickpea protein and technological properties

Merve Akalan¹ , Mehmet Şükrü Karakuş² , Bülent Başyigit³ , Asliye Karaaslan⁴ 
Mehmet Karaaslan^{5,*} 

^{1,3,5} Harran Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 63300, Şanlıurfa Türkiye

² Harran Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 63300, Şanlıurfa Türkiye

⁴Harran Üniversitesi, Gıda Teknoloji Programı, 63200, Şanlıurfa Türkiye

Öz

Bu çalışmada nohuttan protein eldesi için pH ve ultrasesin eş zamanlı sistematik yaklaşımı ve yanıt yüzey metodolojisi (RSM) ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Protein özütlenme aşamasında özütlenme süresi, ultrases cihaz genliği ve solvent pH'sının protein tozu verimine etkisi değerlendirilmiştir. Optimum özütlenme koşulları (protein tozu verimi: %9.55) özütlenme süresi 42.41 dk, genlik %61.39 ve pH:8.38 olarak belirlenmiştir. Nohut protein tozunun karakteristik yapısı Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile doğrulanmıştır. Nihai tozun teknolojik özellikleri detaylı araştırılmıştır. Proteinin su tutma kapasitesi (STK) %240.24, yağ bağlama kapasitesi (YBK) %213.68, köpürme kapasitesi %37.50, köpük stabilitesi (10-30. dk) %73.33-60.00 bulunmuştur. Emülsiyon özellikleri ise emülsiyon aktivite indeksi (EAI) ve emülsiyon stabilite indeksi (ESI) (10-30. dk), stabilite katsayısı (R) ve santrifüj çökme oranı (CPR) dahil olmak üzere sırasıyla 15.36 m²/g, 62.24-181.30, 0.68 ve %14.60 bulunmuştur. Sonuç olarak, proteinlerin hammaddelerden özütlenmesinde ultrases ve pH eş zamanlı uygulaması yenilikçi ve umut verici bir yöntem olabilir.

Anahtar kelimeler: Nohut proteini, Ultrases destekli özütlenme, FTIR spektroskopisi, Tekno-fonksiyonel özellikler, Emülsiyon

1 Giriş

Toplumlarda zaman içerisinde ortaya çıkan problemlere bağlı olarak son yıllarda dünya genelinde bitkisel kaynaklı proteinlere olan talep artmıştır. Bu problemlerden ilki ve en önemlisi artan küresel nüfusun beslenme gereksinimlerinin karşılanması ile ilgilidir. Vegan/vejetaryen tüketicilerin ve popülasyonlarda çölyak hastalığının artışı ise diğer göz ardı edilmemesi gereken nedenler olarak verilebilir [1,2]. Bitkisel proteinler her ne kadar belirtilen gereksinimlere doğrudan cevap verme potansiyelleri olsa da hayvansal kaynaklı proteinlerle kıyaslandığında teknolojik özellikler açısından sergilemiş oldukları davranışlar istenilen

Abstract

In this study, the simultaneous systematic approach of pH and ultrasound for protein extraction from chickpea was optimized by response surface methodology (RSM). The effect of extraction time, ultrasonic device amplitude, and solvent pH on protein powder yield was evaluated in the protein extraction step. The optimum extraction conditions (protein powder yield: 9.55%) were determined as extraction time 42.41 min, amplitude 61.39% and pH: 8.38. The characteristic structure of chickpea protein powder was confirmed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Techno-functional properties of the final powder were investigated. Water holding capacity (WHC) of protein was 240.24%, fat binding capacity (FBC) was 213.68%, foaming capacity was 37.50%, foam stability (10-30 min) was 73.33-60.00%. Emulsion properties including emulsion activity index (EAI) and emulsion stability index (ESI) (10-30 min), stability coefficient (R) and centrifugal precipitation rate (CPR) were 15.36 m²/g, 62.24-181.30, 0.68 and 14.60%, respectively. In conclusion, the simultaneous application of ultrasound and pH can be an innovative and promote method for the extraction of proteins from raw materials.

Keywords: Chickpea protein, Ultrasound-assisted extraction, FTIR spectroscopy, Techno-functional properties, Emulsion

seviyelerde değildir [3]. Ayrıca, pazarda yer alan soya proteini gibi bitkisel kaynakların tüketimine bağlı olarak alerjenite problemlerinin ortaya çıktığı yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [4]. Belirtilen noktalar halihazırda piyasada var olan bitkisel kaynaklı proteinlerin endüstride doğrudan kullanımını sınırlamaktadır. Bu yüzden alternatif bitkisel kaynaklı proteinlerin pazara sunulması bilimsel literatürün ve endüstrinin öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Doğada var olan bitkisel materyallerin tamamından protein elde etmek mantıklı bir yaklaşım olarak görülmektedir. Proteinlerin elde edileceği ham maddenin bazı özelliklere sahip olması bu noktada önem arz etmektedir. İyi bir

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mk385@cornell.edu (M. Karaaslan)

Geliş / Received: 12.05.2023 Kabul / Accepted: 11.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1296312

kaynağın olabildiğince yüksek oranda protein içermesi ve alerjen özelliklerin minimum seviyelerde olması gerekmektedir. Belirtilen noktalar göz önüne alındığında içermiş olduğu protein miktarı (%13-31) ve düşük alerjen içeriği nedeniyle nohut ön plana çıkmaktadır [5]. Ayrıca nohut dünyanın farklı bölgelerinde yetiştirilmekte ve yıllık bazda en fazla yetiştirilen ilk üç baklagil türünden birisidir ki bu durum hammaddeye ulaşım noktasında oluşabilecek problemlerin minimum seviyelerde olduğunun açık bir göstergesidir [6].

Nohut proteinlerinin de içinde yer aldığı farklı bitkisel kaynaklı proteinlerin özütlenmesinde alkali uygulamaların başarısı önceki çalışmalarda not edilmiştir [7]. Kenevir tohumu [8], kayısı çekirdeği [9] ve bezelye [10] proteinleri alkali koşullarda elde edilen bitkisel kaynaklı proteinlere birer örnektir. Çalışmalarda özütleme solventi olarak ya da doğrudan sodyum hidroksit farklı konsantrasyonları ya da farklı pH değerlerine sahip saf su kullanılmıştır [11,12]. Bu çalışmalarda kullanılan solventin pH değeri başta özütleme verimi olmak üzere nihai protein tozlarının karakteristik özellikleri üzerine etkisinin önemli olduğunu vurgulanmıştır. Ayrıca özütleme için uygun pH değerinin ham maddeye göre değişiklik gösterdiği not edilmiştir. Dolayısıyla tesadüfi seçilen bir alkali pH değerinde protein özütleme işleminin efektif bir şekilde yürütülebileceğinin kesinliği söz konusu değildir.

Gıda endüstrisinde yenilikçi teknolojilerin (mikrodalga, enzim ve ultrases destekli vb.) kullanımı ile alkali yöntemlere kıyasla daha yüksek protein verimi elde edildiği yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [13,14]. Son yıllarda çevre dostu teknolojiler arasında yer alan ultrases destekli özütleme sistemleri de bitkisel kaynaklardan proteinlerin elde edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde özütleme işleminde kullanılan çözücü ham maddeye daha iyi nüfus eder, kütle transferi daha hızlı olur ve hücre duvarı bozulan ham maddeden özütlenecek materyaller daha yüksek oranlarda salınırlar [15]. Sonuç olarak ultrases destekli özütleme sistemlerinde proses yüksek verimde neticelendirilir [16]. Literatür verilerinde bu verimin, özütleme zamanı, cihaz genliği, cihaz gücü, ham maddenin parçacık boyutu, özütleme sıcaklığı ve sıvı-katı oranı gibi çeşitli parametrelere bağlı olduğu ortaya konulmuştur [17].

Belirtilen hususlar dikkate alındığında bitkisel kaynaklı proteinlerin özütlenmesinde kullanılan yöntemlerden olan alkali ve ultrases destekli özütleme koşullarının optimize edilmesi gerekliliği net bir şekilde görülmektedir. Optimizasyon işleminde tek değişken yaklaşımı zaman alıcı, pahalı ve verimsizdir [18]. Bu yüzden tek değişken yerine sınırlı sayıda çalışma ile daha fazla bilgiye ulaşmak için deneysel tasarım yaklaşımlarını kullanmak daha makul görülmektedir [19].

Solvent olarak farklı pH değerlerine sahip su kullanarak nohuttan proteinlerin ultrases destekli sistemler yardımıyla özütlenmesine yönelik literatürdeki veri setleri sınırlıdır. Bu yüzden bu çalışmada ilgili bitkiden proteinlerin eldesi için özütleme süresi, ultrases cihaz genliği ve solvent pH'sı eş zamanlı olarak sistematik yaklaşımla optimize edilmiştir. Optimum koşullarda üretilen protein tozlarının karakteristik

yapısı FTIR spektroskopisi ile araştırılmıştır. Ayrıca tozların detaylı tekno-fonksiyonel özellikleri su tutma kapasitesi (STK), yağ bağlama kapasitesi (YBK), köpük kapasitesi/stabilitesi, Emülsiyon aktivite indeksi (EAI), emülsiyon stabilite indeksi (ESI), stabilite indeksi, stabilite katsayısı (R) ve santrifüj çökme oranı (CPR) analizleri ile ortaya konmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Protein eldesinde ham madde olarak kullanılan nohut örnekleri Şanlıurfa'da faaliyet gösteren yerel firmalardan temin edilmiştir (Protein oranı: 18.2 g/100g). Özütleme öncesi ham maddenin yüzey alanı laboratuvar tipi bir öğütücü (DMS253, Demisan, Türkiye) kullanılarak artırılmıştır (Partikül çapı: 1-2 mm). Çalışmada Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, ABD) ve Merck (Darmstadt, Almanya) firmalarından temin edilen analitik saflığa sahip kimyasallar kullanılmıştır.

2.2 Protein özütlemesi

Protein özütleme deney tasarımı özütleme süresi, ultrases cihaz genliği ve solvent pH'sı bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlerin protein verimi üzerindeki etkileri yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak merkezi tümleşik tasarım ile araştırılmıştır. Deney tasarımı, merkez noktasında 6 tekrar olmak üzere 20 denemeden oluşmuştur.

Protein özütlemesi için, öğütülmüş nohut örnekleri ve distile su 1:10 (w/v) oranında karıştırılmıştır. Deney tasarımına göre farklı özütleme süresi (5-60 dk), farklı genlik (%20-100) ve 1M NaOH ve/veya 1M HCl ile farklı pH (2-10) değerlerine ayarlanan solüsyonlar ultrases cihazında (Wiseclean WUC-D10H) eş zamanlı olarak özütlemeye tabi tutulmuştur. Belirlenen süreler sonunda solventler 4 °C'de 4000 rpm'de 15 dk santrifüjlendikten sonra, süpernatantlar toplanmış ve pH değerleri 1M HCl ile 4.5'e ayarlanmıştır. Daha sonra proteinlerin tamamen çökmesi için ilgili solüsyonlar bir gece boyunca 4 °C'de bekletilmiştir. Süre sonunda santrifüjleme (4 °C'de 4000 rpm'de 15 dk) işlemine tabi tutulan örneklerden süpernatantlar uzaklaştırılmış ve dipte kalan çökeltiler (proteinler) dondurarak kurutma cihazı (CoolerMed, Türkiye) ile kurutulmuştur. Elde edilen tozlar analizler gerçekleştirilinceye kadar 4 °C'de muhafaza edilmiştir.

2.3 FTIR spektroskopisi

Optimum noktada elde edilen protein tozlarının spektrumları FTIR cihazı (Shidmadzu, Japonya) kullanılarak 500-4500 cm⁻¹ aralığında, 32 sn tarama süresi ve 1 cm⁻¹ çözünürlüğünde ölçülmüştür [20].

2.4 Tekno-fonksiyonel özellikler

2.4.1 Su tutma ve yağ bağlama kapasitesi

Proteinin STK ve YBK özellikleri önceki bir çalışmaya göre belirlenmiştir [21]. Bir gram numune santrifüj tüpüne alınarak STK için 10 mL saf su, YBK için 10 mL ayçiçek yağı ile karıştırılmıştır. Numuneler 1 sa boyunca belli aralıklarla vortekslendikten sonra 24 °C'de 5000 rpm'de 10

dk santrifüjlenmiştir. Süre sonunda tüpler 45 °C açıyla 30 dk boyunca filtre edilerek süpernatant süzülüş ve nihai tartım not edilmiştir. Numunelerin son ağırlıklarının başlangıçtaki ağırlıklarına oranı ile STK ve YBK değerleri hesaplanmıştır.

2.4.2 Köpürme kapasitesi ve stabilitesi

Köpürme kapasitesi için, %1'lik protein (pH 7.0) solüsyonu hazırlanmıştır. Yüz mL'lik ölçüm silindire aktarılan solüsyonun ilk hacmi not edilmiştir. Daha sonra homojenizatör (IKA-T18 Basic, Japonya) ile 12.000 rpm'de 1 dk boyunca karıştırılmış ve süre sonunda oluşan hacim kaydedilmiştir. Köpürme stabilitesi için 10. ve 30. dk'lardaki hacimler kaydedilmiştir. Köpürme kapasitesi ve stabilitesi, aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmıştır (Denklem (1) ve (2)).

$$\text{Köpürme kapasitesi (\%)} = \frac{v_a - v_b}{v_b} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Köpürme stabilitesi (\%)} = \frac{v_t}{v_a} * 100 \quad (2)$$

V_a = Homojenleştirmeden sonraki solüsyon hacmi, V_b = Homojenleştirmeden önceki solüsyon hacmi, V_t = Homojenleştirmeden sonra ilgili zamandaki solüsyon hacmi.

2.4.3 Emülsiyon aktivitesi ve stabilitesi

Emülsiyon hazırlamak için, 100 mL 10 mM potasyum fosfat tampon (pH 7.0) içerisinde 0.5 g protein çözündürülmüştür. Su içinde yağ emülsiyonları (%25 v/v) oluşturmak için bir behere alınan protein solüsyonu (7.5 mL) ve mısır yağı (2.5 mL) 12.000 rpm'de 1 dk boyunca Ultra-Turrax homojenizatör (IKA-T18 Basic, Japonya) ile karıştırılmıştır [22].

Taze hazırlanan emülsiyon (50 µL) ve % 0.1 (w/v)'lik sodyum dodesil sülfat (5 mL) bir tüp içerisinde karıştırılmıştır. Emülsiyon aktivitesini belirlemek için karışımın absorbansı 500 nm'de UV-Vis spektrofotometre (Model UV-1280, Shimadzu, Japonya) ile okunmuştur. Emülsiyon stabilitesi için ise hazırlanan karışımın 10. ve 30. dk'da absorbans değerleri kaydedilmiştir. Emülsiyon aktivitesi ve emülsiyon stabilitesi değerlerini hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Denklem (3) ve (4)).

$$\text{Emülsiyon aktivitesi (m}^2/\text{g)} = \frac{2 * 2.303 * A_i * SF}{C * \varphi * \theta * 1000} \quad (3)$$

$$\text{Emülsiyon stabilitesi (dk)} = \frac{A_0}{A_0 - A_t} * t \quad (4)$$

A_i : homojenizasyon işleminden hemen sonra okunan absorbans değeri; SF: Seyreltme faktörü; C: Protein konsantrasyonu; φ : Optik yol; θ : Yağ hacim fraksiyonu; A_t : Homojenizasyon işleminden sonra ilgili zamanda okunan absorbans değeri.

2.4.4 Stabilite indeksi

Taze hazırlanan 10 mL emülsiyon, 15 mL lik santrifüj tüpüne ilave edilerek 4000 rpm'de 5 dk santrifüjlenmiştir. Santrifüjleme süresi sonunda emülsiyonun tüp içerisindeki

faz ayırımı gözlemlenerek emülsiyon stabilitesi yorumlanmıştır. [23,24].

2.4.5 Stabilite katsayısı

On mL taze emülsiyon, 2000 rpm'de 15 dk santrifüj edilmiştir. Süre sonunda süpernatantın başlangıç hali ve 100 kat seyreltilmiş hali UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 750 nm'de okunmuştur. Stabilite katsayısı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem (5)) [25].

$$\text{Stabilite katsayısı (R)} = \frac{A_2}{A_1} \quad (5)$$

A_1 : Süpernatantın orijinal halinin absorbans değeri; A_2 : Süpernatantın seyreltilmiş halinin absorbans değeri.

2.4.6 Santrifüj çökme oranı

Taze hazırlanan 10 mL emülsiyon, 2500 rpm'de 40 dk santrifüjlenmiştir. Daha sonra sıvı kısım uzaklaştırılarak içerisinde tortu bulunan santrifüj tüpleri 30 dk boyunca ters tutulmuştur. Süre sonunda santrifüj tüpünde kalan çökeltinin ağırlığı tartılarak aşağıdaki denkleme göre santrifüj çökme oranı hesaplanmıştır (Denklem (6)).

$$\text{Santrifüj çökme oranı} = \frac{m_2}{m_1} * 100 \quad (6)$$

m_1 : Başlangıçtaki emülsiyon ağırlığı; m_2 : Çökelti ağırlığı.

2.4.7 İstatistiksel analizler

Analizler üç tekerrürlü yürütülmüş ve sonuçlar ortalama±standart sapma şeklinde ifade edilmiştir. Datalar tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ortalama değerler arasındaki istatistiksel farklar SPSS 22 paket programı (SPSS Inc., Şikago, IL, ABD) TUKEY HSD kullanılarak değerlendirilmiştir. Özütleme optimizasyonunda, tekli ve çoklu dereceden model denklemlerini araştırmak amacıyla Design-Expert yazılımı (Stat Ease, Design Expert 7.0, ABD) kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Özütleme optimizasyonu

Ultras destekli özütleme, bitkisel ve hayvansal kaynaklardan proteinleri özütmek için kullanılan, yeşil çevre dostu popüler bir tekniktir. Yöntem, numuneye yüksek frekanslı ses dalgalarının uygulanmasını içermekte ve bu da hücrelerin parçalanmasına ve içeriklerinin salınmasına neden olmaktadır. Böylelikle elde edilen proteinlerin verimi ve kalitesi artırılabilir [26]. Ultras destekli özütleme etkinliği, özütleme süresi ve ultras cihaz genliği gibi parametreler ile tespit edilmektedir [27]. Ayrıca protein özütlemede pH faktörünün etkisi de yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [28]. Nohut proteininin ultras destekli özütleme ile ilgili literatürde çalışmalar olmasına rağmen, özütleme süresi, ultras cihaz genliği ve solvent pH'sı parametrelerinin nohut protein tozu verimini nasıl etkilediğini gösteren sistematik çalışmaların eksikliği bulunmaktadır. Toz ürünün verimini maksimum seviyeye çıkarmak için nohut proteininin ultras destekli özütleme yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanılarak optimize edilmiştir. Merkezi tümleşik tasarımına göre, özütleme

süresi, ultrases genliği ve çözücü pH'sının toz verimi üzerindeki etkilerini araştırmak için 6 tekrarlı 20 deneme yapılmış ve deneysel sonuçlar **Tablo 1**'de sunulmuştur. Deneysel plana ait toz verimi değerlerinin %1.20-10.90 aralığında değiştiği belirlenmiştir (**Tablo 1**). Toz veriminin pH, genlik ve süreden etkilendiği tespit edilmiştir. **Tablo 1** incelendiğinde toz verimi yanıtının özütleme süresi, genlik ve pH değişkenleri arttıkça arttığını göstermiştir.

Tablo 1. Nohut proteini ultrases destekli özütleme deney tasarımı

Bağımsız değişkenler			Bağımlı değişkenler
Özütleme süresi (dk)	Genlik (%)	pH	Toz verimi (%)
16	89	8.38	6.95
33	100	6.00	6.14
49	89	3.62	3.42
16	36	3.62	1.20
16	89	3.62	3.47
49	36	8.38	8.06
16	36	8.38	4.78
48	36	3.62	1.97
33	60	6.00	5.66
60	60	6.00	7.64
33	20	6.00	1.94
33	60	6.00	7.62
33	60	6.00	7.44
33	60	6.00	7.19
33	60	10.00	10.90
33	60	2.00	5.33
49	89	8.38	6.70
33	60	6.00	7.69
5	60	6.00	2.22
33	60	6.00	7.01

Toz verimi tahmin edilen değerleri regresyon modelleri kullanılarak hesaplanmış ve deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır (**Tablo 2**). Doğrusal, 2FI ve kübik modellerin istatistiksel analiz sonuçlarının birbiriyle uyumsuz olması sonucunda Kuadratik modele ait R^2 ve R^2_{adj} değerlerinin yüksek olması, uyum eksikliğinin önemsiz olması ve p-değerinin oldukça önemli olmasından dolayı en uygun model olarak seçilmiştir (**Tablo 2**). **Tablo 2**'de yer alan varyans analizi (ANOVA) sonuçları incelendiğinde, belirleme katsayısı (R^2) ve düzeltilmiş belirleme katsayısı (R^2_{adj}), p ve uyum eksikliği değerleri model belirlemede belirleyici rol oynamışlardır. R^2 ve R^2_{adj} değerleri sırasıyla 0.8917 ve 0.7941 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, modelin test verileri için doğru bir şekilde yorumlandığını ve verilerin tahmin edilen değerlerle uyumlu olduğu saptanmıştır. Ayrıca p-değerinin $p < 0.001$ olması modellemenin istatistiki açıdan oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Modellerin geçerliliği, varyasyonu doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla modellerin uygunluğunu gösteren uyum eksikliği testi ($p > 0.05$) kullanılarak doğrulanmıştır [29]. Toz verimi yanıtı için uyum değeri eksikliğinin önemsiz olması ($p > 0.05$), modelin deneysel verilere uygunluğunu göstermiştir. Toz verimi üzerine pH $p < 0.001$, süre ve genlik değişkenleri ise $p < 0.05$ düzeyinde önemli bulunmuştur (**Tablo 3**). Ayrıca toz verimi üzerine süre \times süre ve genlik \times genlik etkileşimlerinin sırasıyla $p < 0.05$ ve $p < 0.01$ düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir. En yüksek toz verimi özütleme süresinin 42.41 dk, genliğin %61.39 ve pH: 8.38

olduğu deneme noktasında belirlenmiştir. Optimum nokta belirlendikten sonra elde edilen özütler dondurarak kurutma ile toz forma dönüştürülmüş ve analizlerde kullanılmıştır.

Tablo 2. Nohut proteininin ultrases destekli özütlemesine ait yanıt yüzey istatistikleri

Bağımlı değişken	Modeller	Std. sp.	R^2	R^2_{adj}	p-değeri	Uyum eksikliği
Toz verimi	Doğrusal	1.85	0.5650	0.4835	0.0033**	0.0150
	2FI	1.97	0.5975	0.4117	0.0367*	0.0095
	Kuadratik	1.17	0.8917	0.7941	0.0009***	0.0846
	Kübik	1.02	0.9499	0.8413	0.0071**	0.0565

İstatistiksel farklılıklar * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), *** ($p < 0.001$) olarak belirtilmiştir.

Tablo 3. Nohuttan protein özütleme optimizasyonuna ait model katsayıları

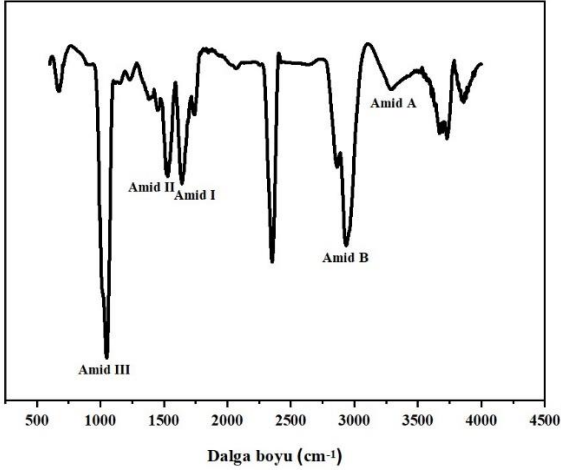
Model katsayıları/Değer	Toz verimi
β_0	7.13***
Kuadratik	
β_1 (Süre)	0.94*
β_2 (Genlik)	0.85*
β_3 (pH)	1.86***
Etkileşimli	
β_{12} (Süre \times Genlik)	-0.54
β_{13} (Süre \times pH)	0.29
β_{23} (Genlik \times pH)	-0.37
İkinci derece	
β_{11} (Süre \times Süre)	-0.99*
β_{22} (Genlik \times Genlik)	-1.30**
β_{33} (pH \times pH)	0.14

Model: Toz verimi (Bağımlı değişken) = $\beta_0 + \beta_1(\text{Süre}) + \beta_2(\text{Genlik}) + \beta_3(\text{pH}) + \beta_{12}(\text{Süre} \times \text{Genlik}) + \beta_{13}(\text{Süre} \times \text{pH}) + \beta_{23}(\text{Genlik} \times \text{pH}) + \beta_{11}(\text{Süre} \times \text{Süre}) + \beta_{22}(\text{Genlik} \times \text{Genlik}) + \beta_{33}(\text{pH} \times \text{pH})$
* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

3.2 FTIR spektroskopisi

Bir proteinin yapısındaki peptid bağları ve aminoasit yan zincirleri gibi fonksiyonel grupların titreşim hareketi sonucu dipol momentumunun değişimi, spektrum olarak pik verir [30]. Nohut proteini FTIR spektrumu **Şekil 1**'de sunulmuştur. FTIR spektrumlarında amid I (1700-1600 cm^{-1}) amid II (1600-1500 cm^{-1}) amid III (1300-1000 cm^{-1}) amid A (3000-3500 cm^{-1}) ve amid B (2850-2980 cm^{-1}) olarak bilinen dalga boyları proteinlerin parmak izi bölgesi olarak tanımlanır [31,32]. **Şekil 1**'e bakıldığında nohut proteini karakteristik bantlarından C=O esnemesini belirten amid I bandı 1649 cm^{-1} dalga boyunda, N-H deformasyonunu belirten amid II bandı 1528 cm^{-1} dalga boyunda, C-N esnemesini belirten amid III bandı ise 1046 cm^{-1} dalga boyunda görülmüştür. Ayrıca N-H gerilmesi, H bağlarının sayısına atfedilen amid A (3292 cm^{-1}) bandı ve =CH ve -NH₃ gruplarının asimetric titreşimine atfedilen amid B (2957 cm^{-1}) bandı da belirgin olarak görülmektedir. FTIR spektrumunda bu karakteristik bantların varlığı, pH ve ultrasesin eş zamanlı uygulaması ile protein özütlemesinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini doğrulamaktadır. FTIR spektroskopisi kullanılarak ketencik tohumu proteini yapısını doğrulamak için yapılan çalışmada amid grubunun

proteinlerin karakteristik grubu olduğu bildirilmiştir. Amid I bandı 1642 cm^{-1} , amid II bandı 1544 cm^{-1} ve amid III bandı 1236 cm^{-1} ile tanımlanmıştır [33]. Çalışmada elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu ve protein yapısını doğruladığı saptanmıştır.



Şekil 1. Nohut proteini FTIR spektrumu

3.3 Tekno-fonksiyonel özellikler

Bitkisel proteinlerin STK değerleri, protein türü, kimyasal bileşimlere, yapılarına ve elde edildiği kaynağa göre değişebilmektedir [34]. STK değeri, proteinlerin şekil, büyüklük, proteinler üzerindeki amino asit dengesi, çözünürlük ve pH gibi fizikokimyasal parametrelere bağlıdır [35]. Bu çalışmada elde edilen nohut protein tozunun STK değeri %240.24 olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Farklı kurutma tekniklerinin nohut proteini üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada STK değerleri 206.34-270.84 g/100g aralığında bildirilmiştir [36]. Literatürde iki farklı nohut çeşidi üzerine kavurma ve çimlendirme muamele etkisinin incelendiği çalışmada alkali özütleme uygulanan nohut örneklerinde STK değerleri %193 (Arerti) ve %180 (Natoli) olarak tespit edilmiştir [37]. Bir başka çalışmada ise alkali özütleme sonrası elde edilen nohut proteinin STK değeri yaklaşık %120 olarak rapor edilmiştir [38]. Yapılan bir çalışmada vişne çekirdeği, nar çekirdeği ve bezelye proteinlerinin STK değerleri sırasıyla %208, %191 ve %398 olarak bulunmuştur [39]. Yüksek STK değeri, daha az miktarda çözünür protein kaybından ve yüksek miktarda polar amino asitlerin varlığından kaynaklanmaktadır [36]. Yüksek STK'li proteinler daha fazla su tutabilmekte ve tekstürel özellikler üzerinde iyileştirici etkiye sahip olabilmektedirler. Bir proteinin YBK'sı, belirli bir miktarda protein tarafından bağlanabilen yağ miktarı olarak tanımlanmıştır. YBK, protein içeriği, yüzey alanı, hidrofobiklik, yük ve topografya, yağın likiditesi ve kullanılan yöntem gibi bir dizi faktörden etkilendiği bildirilmiştir [40]. Yağın gıda bileşenlerine, özellikle proteinlere ve karbonhidratlara bağlanması, dokusal ve diğer gıda kalitesi özelliklerini etkilemektedir. Proteinlerin YBK'sı, emülsiyonlarda ve diğer gıda sistemlerinde lipitlerle etkileşime girme yeteneği, gıda formülasyonlarında önem arz etmektedir [41]. Bu çalışmada örneğin YBK değeri

%213.68 olarak bulunmuştur (Tablo 4). Kurutma yöntemlerinin nohut protein konsantrasyonlarının fizikokimyasal ve fonksiyonel özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmada YBK değerleri %191.39-277.05 arasında rapor edilmiştir [36]. Ultrases uygulamadan alkali özütleme ile elde edilen nohut proteinlerinin YBK değeri %188 olarak bildirilmiştir [42]. Vişne çekirdeği, nar çekirdeği ve bezelye gibi farklı bitki bazlı proteinlerin YBK değerleri sırasıyla %162, %284 ve %92 olarak belirlenmiştir [39]. Vişne çekirdeği proteinin tekno-fonksiyonel özelliklerinin araştırıldığı çalışmada YBK değeri %155 olarak tespit edilmiştir [43]. YBK'nın yüksek olması, proteinlerin gelişmiş hidrofobik özelliklerine ve polar olmayan amino asit yan zincirlerinin üstün yağ bağlama performansına bağlanmıştır [44]. Yüksek YBK'nın, yağlı gıdalara ilave edilerek daha iyi lezzet profili oluşturduğu ve gıda ürünlerinin raf ömrünü uzattığı bildirilmiştir [45]. Köpürme kapasitesi oluşturulan bir köpüğün hacmini, köpük stabilitesi ise süre boyunca köpük hacmindeki değişimi ölçmektedir [46]. Köpüğün kalitesi, proteinlerin çözünürlükleri, hidrofobiklikleri ve moleküller arası bağ oluşturma yetenekleri gibi yapısal ve fonksiyonel özelliklerine bağlıdır. Bitki proteinleri, amino asit bileşimlerine, moleküler ağırlıklarına ve diğer faktörlere bağlı olarak köpürme kapasiteleri ve stabilitesi bakımından farklılık göstermektedir [47]. Çalışmada elde edilen köpürme kapasitesi %37.50, köpük stabilitesi ise 10. ve 30. dk için sırasıyla %73.33 ve %60.00 olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Literatürde yer alan bir çalışmada nohut proteinlerinin köpürme kapasiteleri %41.93-58.06 olarak saptanmıştır [36]. Farklı bitkisel proteinler ile yapılan başka bir çalışmada proteinlerin köpürme kapasiteleri incelenmiştir (Vişne çekirdeği proteini: %39; nar çekirdeği proteini: %46.50 ve bezelye proteini: %92.50). Aynı çalışmada proteinlerin köpük stabilitesi de incelenmiş ve vişne çekirdeği (%0.00), nar çekirdeği (%9.02) ve bezelye (%83.50) proteinleri rapor edilmiştir [39]. Ayrıca dondurarak kurutma ile elde edilen vişne çekirdeği proteinlerinin köpürme kapasitesi ve köpük stabilitesi değerleri sırasıyla %9.00 ve %4.00 olarak bildirilmiştir [43].

EAI, bir proteinin bir emülsiyonu stabilize etme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Belirli koşullar altında belirli bir miktarda su içinde yağ emülsiyonunu stabilize etmek için gereken protein miktarını belirtmektedir. ESI ise, bir proteinin, bir emülsifiye edici madde tarafından bir arada tutulan ve birbiriyle karışmayan iki sıvının (genellikle yağ ve su) karışımı olan bir emülsiyonu stabilize etme yeteneğini ifade etmektedir [46]. Örneğin EAI değeri $15.36\text{ m}^2/\text{g}$, ESI 10. ve 30. dk için sırasıyla 62.24 ve 181.30 olarak tespit edilmiştir. EAI'nın yüksek olması, hidrofobik amino asit kalıntılarının açığa çıkmasına yol açan ve sonuç olarak yüzey aktivitesini ve yağ ve su arayüzünde adsorpsiyonu artıran küresel proteinlerin ayrışması ve kısmen açılmasından kaynaklanabileceğine atfedilmiştir [48]. Nohut proteini izolatu ile yapılan çalışmada EAI değeri $1.08\text{ m}^2/\text{g}$ olarak tespit edilmiştir [42]. Ayrıca nohut proteini üzerine yapılan başka çalışmalarda EAI değerleri 5.7 - $253\text{ m}^2/\text{g}$ aralıklarında bildirilmiştir [49-51].

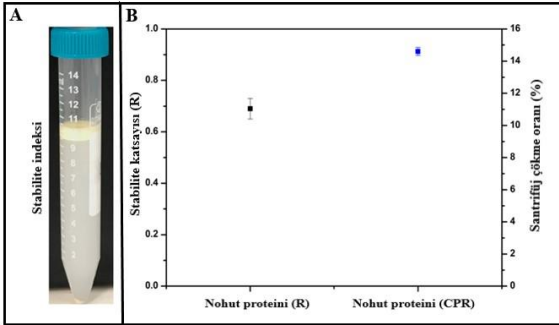
Tablo 4. Nohut proteininin tekno-fonksiyonel özellikleri

Parametreler	Değerler
Su tutma kapasitesi (%)	240.24±2.47
Yağ bağlama kapasitesi (%)	213.68±1.96
Köpürme kapasitesi (%)	37.50±0.91
Köpük stabilitesi (%) (10 dk)	73.33±1.76
Köpük stabilitesi (%) (30 dk)	60.00±1.25
Emülsiyon aktivitesi indeksi (EAI) (m ² /g)	15.36±0.72
Emülsiyon stabilite indeksi (ESI10)	62.24±1.45
Emülsiyon stabilite indeksi (ESI30)	181.30±1.78

Veriler, üç kopyanın (n=3) ortalama ± standart sapması olarak verilmiştir.

3.4 Stabilite indeksi, stabilite katsayısı ve santrifüj çökme oranı

Stabilite indeksi, su içinde yağ emülsiyonunun kararlılığını belirlemek amacıyla santrifüj sonrası oluşan faz ayrımına göre belirlenebilmektedir. Kararsız bir yapı sergileyen emülsiyonlarda yağ fazı ve serum fazı ayrılmakta, dolayısıyla emülsiyon stabilitesini koruyamamaktadır. Bu yüzden faz ayrımının en düşük seviyede olması emülsiyon kararlılığı açısından tercih edilmektedir [52]. Nohut proteini ile hazırlanan emülsiyonların stabilite indeksi Şekil 2A' da sunulmuştur. Santrifüjleme işlemi sonrası oluşturulan emülsiyonda yağ fazı ayrımı görülmemiştir. Bu durum nohut proteininin yüzey aktif madde özelliğini ortaya çıkarmaktadır. R ve CPR da su içinde yağ emülsiyonlarının kararlılığını belirleyen parametrelerdendir. Bu değerler, emülsiyon kararlılığı açısından ters korelasyon gösterirler. Stabilitesi yüksek olan emülsiyonların R değeri yüksek, CPR değeri düşük olur [25].



Şekil 2. Nohut proteininin stabilite indeksi, stabilite katsayısı ve santrifüj çökme oranı.

Nohut proteini ile hazırlanan emülsiyon için R değeri 0.68, CPR değeri ise %14.60 bulunmuştur (Şekil 2B). Li ve ark., (2019) kolza proteini ile oluşturulan emülsiyonun stabilitesini araştırdıkları çalışmalarında, 0 ile 1 arasında olan R değerinin 1'e yaklaştıkça emülsiyonun kararlılığının arttığı ve daha stabil bir yapı gösterdiği, kolza proteini içeren emülsiyonda R değerinin 0.40 olduğu, CPR değerinin ise yaklaşık %43 olduğu rapor edilmiştir [25]. Nohut proteininin R değerinin (0.68) daha yüksek, CPR değerinin (%14.60) ise düşük olması, bu proteinin emülsiyon içerisinde sergilemiş olduğu davranışı ortaya koymaktadır. Ayrıca emülsiyon

aktivitesi, emülsiyon stabilitesi analizleri sonuçlarının da bu durumu desteklediği görülmüştür.

4 Sonuçlar

Son yıllarda, ekolojik, sağlık ve hayvan refahı üzerindeki etkileri nedeniyle hayvansal protein kaynakları yerini bitkisel kökenli proteinlere bırakmaya başlamıştır. Bitkisel bazlı proteinler arasında soya, bezelye ve nohut gibi protein kaynakları ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, ultrases ve çözücü pH'sının eş zamanlı uygulama yaklaşımı ile optimize edilmiş nohut proteininin spektrofotometrik, tekno-fonksiyonel ve emülsiyon özellikleri araştırılmıştır. Ultrases ile özütleme nohut proteininin emülsifiye edici ve köpük oluşturma özelliklerine sahip olduğu ve bu sayede çeşitli gıda uygulamaları için kabul edilebilir olabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan bu çalışma, protein kaynaklarının çeşitlendirilmesine, gıda uygulamalarında nohut proteininin yüzey aktif madde ve doğal emülgatör olarak kullanımına yönelik çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] R. Dias, C.B. Pereira, R. Pérez-Gregorio, N. Mateus, and V. Freitas, Recent advances on dietary polyphenol's potential roles in Celiac Disease, Trends in Food Science & Technology, 107, 213–225, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.033>.
- [2] S. Redecillas-Ferreiro, A. Moráis-López, and J. Manuel Moreno-Villares, Position paper on vegetarian diets in infants and children. Committee on Nutrition and Breastfeeding of the Spanish Paediatric Association, Anales de Pediatría (English Edition). 92, 306.e1-306.e6, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.anpede.2019.10.004>.
- [3] M. Nikbakht Nasrabadi, A. Sedaghat Doost, and R. Mezzenga, Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products, Food Hydrocolloids, 118, 106789, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106789>.
- [4] X. Pi, Y. Sun, X. Deng, D. Xin, J. Cheng, and M. Guo, Investigation of differences in allergenicity of protein from different soybean cultivars through LC/MS-MS, International Journal of Biological Macromolecules, 220, 1221–1230, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.154>.
- [5] C. Bi, S. Chi, T. Zhou, J. Zhang, X. Wang, J. Li, W. Shi, B. Tian, Z. Huang, and Y. Liu, Effect of low-frequency high-intensity ultrasound (HIU) on the physicochemical properties of chickpea protein, Food Research International, 159, 111474, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111474>.
- [6] J. Glusac, S. Isaschar-Ovdat, and A. Fishman, Transglutaminase modifies the physical stability and digestibility of chickpea protein-stabilized oil-in-water emulsions, Food Chemistry, 315, 126301, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126301>.

- [7] E.M. Papalamprou, G.I. Doxastakis, C.G. Biliaderis, and V. Kiosseoglou, Influence of preparation methods on physicochemical and gelation properties of chickpea protein isolates, *Food Hydrocolloids*, 23, 337–343, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.03.006>.
- [8] F. Potin, E. Goure, S. Lubbers, F. Husson, and R. Saurel, Functional properties of hemp protein concentrate obtained by alkaline extraction and successive ultrafiltration and spray-drying, *International Journal of Food Science & Technology*, 57, 436–446, 2022. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15425>.
- [9] M. Mutlu, and A.A. Hayaloglu, Determination of bioactivity of seed protein hydrolysates and amygdalin content for some apricot (*Prunus armeniaca L.*) varieties grown in Malatya, Turkey, *Food Analytica Group*, 2022. <https://doi.org/10.57252/10.57252.2022.2>.
- [10] Z. Gao, P. Shen, Y. Lan, L. Cui, J.-B. Ohm, B. Chen, and J. Rao, Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate, *Food Research International*, 131, 109045, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109045>.
- [11] M. Çelik, M. Güzel, and M. Yildirim, Effect of pH on protein extraction from sour cherry kernels and functional properties of resulting protein concentrate, *Journal of Food Science & Technology*. 56, 3023–3032, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03785-8>.
- [12] L.M. Devi, and L.S. Badwaik, Influence of temperature, time and alkali concentration on protein extraction from muskmelon seed meal, *Indian Chemical Engineer*, 64, 219–226, 2022. <https://doi.org/10.1080/00194506.2021.1915887>.
- [13] A. Ochoa-Rivas, Y. Nava-Valdez, S.O. Serna-Saldívar, and C. Chuck-Hernández, Microwave and Ultrasound to Enhance Protein Extraction from Peanut Flour under Alkaline Conditions: Effects in Yield and Functional Properties of Protein Isolates, *Food and Bioprocess Technology*, 10, 543–555, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1838-3>.
- [14] M. Tirgar, P. Silcock, A. Carne, and E.J. Birch, Effect of extraction method on functional properties of flaxseed protein concentrates, *Food Chemistry*, 215, 417–424, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.002>.
- [15] Hao Feng, Gustavo Barbosa-Canovas, and Jochen Weiss, *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, Springer New York, New York, NY, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3>.
- [16] B.K. Tiwari, Ultrasound: A clean, green extraction technology, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 100–109, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>.
- [17] K. Kumar, S. Srivastav, and V.S. Sharanagat, Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review, *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>.
- [18] N. Teslić, N. Bojanić, D. Rakić, A. Takači, Z. Zeković, A. Fišteš, M. Bodroža-Solarov, and B. Pavlič, Defatted wheat germ as source of polyphenols—Optimization of microwave-assisted extraction by RSM and ANN approach, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 143, 107634, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107634>.
- [19] H. Alasalvar, and Z. Yildirim, Ultrasound-assisted extraction of antioxidant phenolic compounds from *Lavandula angustifolia* flowers using natural deep eutectic solvents: An experimental design approach, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 22, 100492, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100492>.
- [20] M. Lei, F.-C. Jiang, J. Cai, S. Hu, R. Zhou, G. Liu, Y.-H. Wang, H.-B. Wang, J.-R. He, and X.-G. Xiong, Facile microencapsulation of olive oil in porous starch granules: Fabrication, characterization, and oxidative stability, *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 755–761, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.051>.
- [21] S.M. Cho, K.S. Kwak, D.C. Park, Y.S. Gu, C.I. Ji, D.H. Jang, Y.B. Lee, and S.B. Kim, Processing optimization and functional properties of gelatin from shark (*Isurus oxyrinchus*) cartilage, *Food Hydrocolloids*, 18, 573–579, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2003.10.001>.
- [22] H.W. Lee, Y. Lu, Y. Zhang, C. Fu, and D. Huang, Physicochemical and functional properties of red lentil protein isolates from three origins at different pH, *Food Chemistry*, 358, 129749, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129749>.
- [23] W. Wang, G. Du, C. Li, H. Zhang, Y. Long, and Y. Ni, Preparation of cellulose nanocrystals from asparagus (*Asparagus officinalis L.*) and their applications to palm oil/water Pickering emulsion, *Carbohydrate Polymers*, 151, 1–8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.052>.
- [24] B. Başığit, Arap Zamkı, Karboksimetil Selüloz ve Maltodekstrin ile Stabilize Edilmiş Su İçinde Yağ Bazlı Emülsiyon Sistemlerinin Stabilitate Davranışları, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 341–351, 2023. <https://doi.org/10.21597/jist.1201844>.
- [25] Q. Li, Z. Wang, C. Dai, Y. Wang, W. Chen, X. Ju, J. Yuan, and R. He, Physical stability and microstructure of rapeseed protein isolate/gum Arabic stabilized emulsions at alkaline pH, *Food Hydrocolloids*, 88, 50–57, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.09.020>.
- [26] F. Chemat, Zill-e-Huma, and M.K. Khan, Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction, *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 813–835, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>.
- [27] M.C. Herrera, and M.D. Luque de Castro, Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from strawberries prior to liquid chromatographic separation and photodiode array ultraviolet detection, *Journal of*

- Chromatography A, 1100, 1–7, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.09.021>.
- [28] I.Y. Mizubuti, O. Biondo Júnior, L.W. de Oliveira Souza, R.S. dos Santos Ferreira da Silva, and E.I. Ida, Response surface methodology for extraction optimization of pigeon pea protein, Food Chemistry, 70, 259–265, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00078-9).
- [29] L. Quanhong, and F. Cai, Application of response surface methodology for extraction optimization of germinant pumpkin seeds protein, Food Chemistry, 92, 701–706, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.042>.
- [30] P.I. Haris, Probing protein–protein interaction in biomembranes using Fourier transform infrared spectroscopy, Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes, 1828, 2265–2271, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2013.04.008>.
- [31] J. Kong, and S. Yu, Fourier Transform Infrared Spectroscopic Analysis of Protein Secondary Structures, Acta Biochimica et Biophysica Sinica, 39, 549–559, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x>.
- [32] S.E. Ebrahimi, A. Koocheki, E. Milani, and M. Mohebbi, Interactions between *Lepidium perfoliatum* seed gum – Grass pea (*Lathyrus sativus*) protein isolate in composite biodegradable film, Food Hydrocolloids, 54, 302–314, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.10.020>.
- [33] J. Liu, M. Wu, M. Wang, Y. Zou, Z. Tan, D. Wang, and X.S. Sun, Predicting the content of camelina protein using FT-IR spectroscopy coupled with SVM model, Cluster Computing, 22, 8401–8406, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-1838-3>.
- [34] M.C. Cortez-Trejo, M. Gaytán-Martínez, M.L. Reyes-Vega, and S. Mendoza, Protein-gum-based gels: Effect of gum addition on microstructure, rheological properties, and water retention capacity, Trends in Food Science & Technology, 116, 303–317, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.030>.
- [35] A.K. Jukanti, P.M. Gaur, C.L.L. Gowda, and R.N. Chibbar, Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): a review, British Journal of Nutrition, 108, S11–S26, 2012. <https://doi.org/10.1017/S0007114512000797>.
- [36] A.M. Ghribi, I.M. Gafsi, C. Blecker, S. Danthine, H. Attia, and S. Besbes, Effect of drying methods on physico-chemical and functional properties of chickpea protein concentrates, Journal of Food Engineering, 165, 179–188, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.021>.
- [37] N. Mesfin, A. Belay, and E. Amare, Effect of germination, roasting, and variety on physicochemical, techno-functional, and antioxidant properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolate powder, Heliyon, 7, 2021.
- [38] M.N. Perović, B.S. Pajin, and M.G. Antov, The effect of enzymatic pretreatment of chickpea on functional properties and antioxidant activity of alkaline protein isolate, Food Chemistry, 374, 131809, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131809>.
- [39] B. Başığit, M. Yücepete, A. Karaaslan, and M. Karaaslan, High efficiency microencapsulation of extra virgin olive oil (EVOO) with novel carrier agents: Fruit proteins, Materials Today Communications, 28, 102618, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102618>.
- [40] T.A. El-Adawy, Functional properties and nutritional quality of acetylated and succinylated mung bean protein isolate, Food Chemistry, 70, 83–91, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00079-0).
- [41] J.F. Zayas, Oil and Fat Binding Properties of Proteins, in: Functionality of Proteins in Food, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 228–259, 1997. https://doi.org/10.1007/978-3-642-59116-7_5.
- [42] G. Zhu, Y. Li, L. Xie, H. Sun, Z. Zheng, and F. Liu, Effects of enzymatic cross-linking combined with ultrasound on the oil adsorption capacity of chickpea protein, Food Chemistry, 383, 132641, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132641>.
- [43] B. Başığit, A. Görgüç, E. Gençdağ, Ü. Cansu, F.M. Yılmaz, and M. Karaaslan, Functional characterization of high-yield plant protein powder valorized from de-oiled sour cherry seed using microwave-assisted enzymatic extraction followed by spray- and freeze-drying, Biomass Conversion and Biorefinery, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03225-2>.
- [44] J.E. Kinsella, and N. Melachouris, Functional properties of proteins in foods: A survey, C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 7, 219–280, 1976. <https://doi.org/10.1080/10408397609527208>.
- [45] C.J. Zhao, A. Schieber, and M.G. Gänzle, Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations – A review, Food Research International, 89, 39–47, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.042>.
- [46] I.A. Wani, D.S. Sogi, U.S. Shivhare, and B.S. Gill, Physico-chemical and functional properties of native and hydrolyzed kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolates, Food Research International, 76, 11–18, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.08.027>.
- [47] S.E. Molina Ortiz, and J.R. Wagner, Hydrolysates of native and modified soy protein isolates: structural characteristics, solubility and foaming properties, Food Research International, 35, 511–518, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00149-1).
- [48] I. Nir, Y. Feldman, A. Aserin, and N. Gartu, Surface Properties and Emulsification Behavior of Denatured Soy Proteins, Journal of Food Science, 59, 606–610, 1994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb05573.x>.
- [49] T. Zhang, B. Jiang, W. Mu, and Z. Wang, Emulsifying properties of chickpea protein isolates: Influence of pH and NaCl, Food Hydrocolloids, 23, 146–152, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.12.005>.
- [50] J.I. Boye, S. Aksay, S. Roufik, S. Ribéreau, M. Mondor, E. Farnworth, and S.H. Rajamohamed,

- Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques, *Food Research International*, 43, 537–546, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.021>.
- [51] A.C. Karaca, N. Low, and M. Nickerson, Emulsifying properties of chickpea, faba bean, lentil and pea proteins produced by isoelectric precipitation and salt extraction, *Food Research International*, 44, 2742–2750, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.012>.
- [52] D.J. McClements, Critical Review of Techniques and Methodologies for Characterization of Emulsion Stability, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47, 611–649, 2007. <https://doi.org/10.1080/10408390701289292>





Elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesinde kullanılan güç aktarım yöntemlerinin incelenmesi

Analysis of power transfer methods used in wireless charging of electric vehicles

Ahmet Hamdi Reyhan¹ , Ahmet Doğan^{2,*} 

¹ Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 38055, Kayseri Türkiye

² Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38055, Kayseri Türkiye

Öz

Kullanımdaki elektrikli araç (EA) sayılarının her geçen gün artması ile birlikte şarj edilmeleri önemli bir problem haline gelmektedir. Günümüzde kurulu şarj istasyonlarının tamamına yakınında EA'lar kablo bağlantısı ile şarj edilmektedir. Kablolü şarj işlemi, uzun şarj süreleri ile birlikte güvenlik açısından da riskler taşımaktadır. Bu nedenle son yıllarda EA'ların kablosuz şarjı ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Diğer taraftan, kablosuz şarj işlemi, EA'ların hareket halinde şarj olabilmelerini ifade eden dinamik şarjın uygulanmasına imkan sağlaması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, EA'ların kablosuz olarak şarj edilebilmesini sağlayan endüktif güç aktarım (EGA), kapasitif güç aktarım (KGA), optik güç aktarım (OGA) ve mikrodalga güç aktarım (MGA) yöntemlerinin temel prensipleri, farklı tasarımları, EA'ların kablosuz şarjı ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak açıklanmıştır. Sonuç olarak, EA'ların kablosuz şarjında kullanılan kablosuz güç aktarım yöntemlerinin avantajları, dezavantajları, fırsatları ve zorlukları karşılaştırmalı olarak kapsamlı bir bakış açısı ile sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç (EA), Kablosuz şarj, Kablosuz güç aktarımı.

1 Giriş

Ulaşım sektörü, sera gazı emisyonlarının yaklaşık %28'ini üreterek hava kirliliğe en çok neden olan sektörlerden biridir [1]. Elektrikli Araçlar (EA)'lar, sera gazı emisyonlarının azaltılarak küresel iklim değişikliğinin önlenmesi ve sürdürülebilir bir ulaşım sektörünün oluşturulmasının temel taşlarından birisidir. Yollardaki EA sayısının her geçen gün artmasıyla beraber, şarj istasyonu sayısının sınırlı olması ve bataryaların yüksek maliyeti EA'ların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerdir [2]. Günümüzde, EA'lar tarafından kullanılan ticari şarj istasyonlarının tamamına yakınında şarj işlemleri kablolu olarak gerçekleştirilmektedir. Kablolü şarj işlemi, uzun şarj süreleri ile birlikte sağlık ve güvenlik riskleri taşımaktadır [3]. Şarj istasyonu kablo bağlantıları, özellikle kötü hava koşullarında tehlike oluşturabilir. Ayrıca, benzin istasyonlarının yakınında ve havaalanları gibi yerlerde EA'ların şarja takılması ve şarjdan çıkarılması sırasında

Abstract

The number of electric vehicles (EV) in use is increasing day by day. With the increasing number of EVs, their charging is becoming a major problem. Today, EVs are charged by cable connection in almost all installed charging stations. Wired charging brings health and safety risks along with long charging times. For this reason, studies with wireless charging of EVs have been developing rapidly in recent years. Wireless charging of EVs is very important due to it allows the application of dynamic charging, which means charging while moving. In this study, the basic principles of inductive power transfer (IPT), capacitive power transfer (CPT), optical power transfer (OPT) and microwave power transfer (MPT) methods that enable wireless charging of EVs, different topology and structures, wireless charging of EVs has been explained by taking into consideration the studies carried out in recent years regarding the charging of the battery. As a result, a comprehensive perspective on the advantages, disadvantages, opportunities and challenges of wireless power transmission methods is presented.

Keywords: Electric vehicle, Wireless charge, Wireless power transfer

elektrik arkı oluşabilir [4]. Bunun yanında, kamuya açık şarj tesisleri vandalizm gibi nedenlerle zarar görebilir [5]. Kablosuz şarj işlemi bu dezavantajların birçoğunu ortadan kaldırırken EA'ların dinamik şarjı için yeni olanaklar sunmaktadır [6].

EA'lar için statik, yarı dinamik ve dinamik olmak üzere üç kablosuz şarj türü tanımlanabilir [7, 8]. Statik şarj, EA'lar park konumundayken gerçekleşir. Kamuya açık otoparklarda veya konutlarda uygulanan şarj yöntemidir. Yarı dinamik şarjda, motoru çalışır durumdaki hareketsiz aracın kısa süreli şarj olması sağlanır. Toplu taşıma araçlarının yolcu duraklarında dururken şarj olması için uygundur. Üçüncü ve en önemli şarj türü ise bir EA'nın hareket halinde iken yol boyunca kablosuz olarak şarj olmasını sağlayan dinamik şarjdır. Bu şarj türünde, yolun belirli bölümlerine, EA'ların hareket halinde şarj işlemini gerçekleştirebilmesi için yola güç transferi vericiler ve güç elektroniği ekipmanları yerleştirilir.

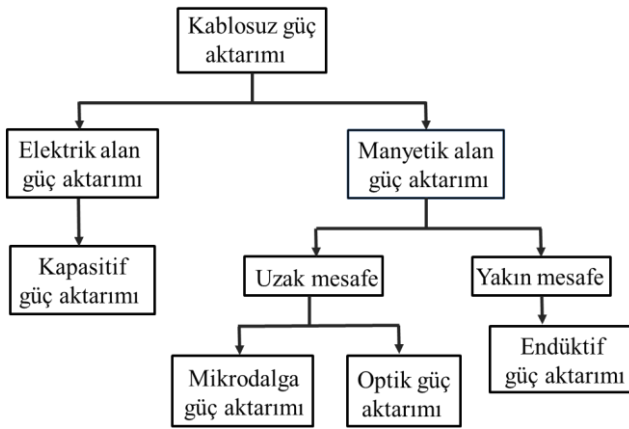
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: adogan@nny.edu.tr (A. Doğan)

Geliş / Received: 31.05.2023 Kabul / Accepted: 06.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1307910

EA'ların menzili batarya kapasitesine göre değişmektedir. Batarya kapasitesi arttıkça EA fiyatı da orantılı olarak artmaktadır ve batarya ağırlığından dolayı yakıt ekonomisi de olumsuz etkilenmektedir. Şarj süreleri de EA'lar için bir diğer dezavantajdır. Şarj süresini 30 dakikanın altına indiren hızlı şarj istasyonları daha maliyetli ve karmaşık sistemlerdir. Buna rağmen şarj süreleri klasik fosil yakıtlı araçların yakıt ikmal sürelerinden fazladır [5]. Batarya kapasitesindeki sınırlamalar nedeniyle, EA'lar daha uzun mesafe kat etmek için daha fazla şarj döngüsüne ihtiyaç duyarlar. Dinamik şarj yöntemi, altyapı maliyeti yüksek olmasına rağmen aracın hareket halinde şarj olmasını sağlar. Hareket halinde şarj olabilen araç daha küçük bataryalarla daha uzun yol alabilir. Bu durum, daha ucuz batarya maliyeti ve daha verimli bir sistem sağlar [9].

Kablosuz şarj yöntemleri; endüktif güç aktarımı (EGA), kapasitif güç aktarımı (KGA), optik (lazer) güç aktarımı (OGA) ve mikrodalga güç aktarımı (MGA) gibi farklı iletim ortamına göre çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir [10–12]. Bu yöntemlerin sınıflandırılması Şekil-1'de verilmiştir. Şarj yöntemleri manyetik alan ve elektrik alan temelli olarak ikiye ayrılmaktadır. KGA'da elektrik alan prensibinden faydalanılırken, diğer yöntemlerde manyetik alan temel alınmıştır. Manyetik alanlı yöntemler yakın mesafe ve uzak mesafe olarak kategorize edilir. EGA yakın mesafe kablosuz şarj kategorisinde iken OGA ve MGA uzak mesafe kategorisinde yer almaktadır.



Şekil 1. KGA yöntemlerinin sınıflandırılması

Kullanılacak yöntemin belirlenmesi; şarj gücü, çalışma frekansı, mesafe, elektromanyetik girişim oranı, şarj sisteminin boyutları, güvenlik sorunları ve sistem karmaşıklığı gibi çeşitli parametreler göz önünde bulundurulurken yapılır [13, 14].

Bu çalışmada EA'ların kablosuz olarak şarj edilebilmesi için kullanılan farklı güç aktarım yöntemleri incelenmiş olup temel araştırma ve uygulamalardaki en yeni gelişmeler sunulmuştur. EA'ların şarjı için kullanılan teknolojiler farklı açılardan karşılaştırılarak birbirlerine göre üstünlükleri ve dezavantajları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Özellikle, önümüzdeki dönemlerde uygulamaları artacak olan dinamik şarj yöntemi açısından güç aktarım yöntemleri değerlendirilmiştir.

2 Endüktif güç aktarımı (EGA)

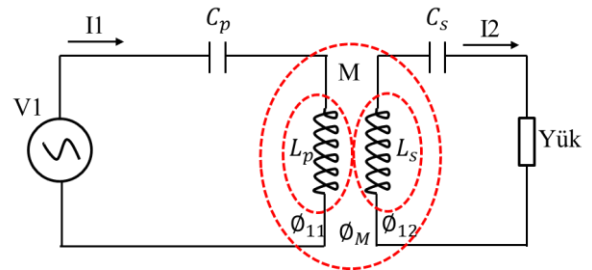
EGA, manyetik akı dağılımı prensibi ile çalışan, geniş güç aralıklarında uygulanabilen ve en olgunlaşmış kablosuz güç aktarım yöntemidir [15]. EGA'da, Amper yasası tarafından tanımlandığı gibi, verici (birincil) bobine zamanla değişen bir akım uygulandığında, bobin etrafında dinamik bir manyetik alan oluşturur. Denklem (1)'de görüldüğü üzere ortaya çıkan manyetik akı, havanın manyetik geçirgenliği, bobin sarım sayısı ve içinden geçen akım ile orantılıdır [5].

$$\sum B_T \Delta l = \mu_0 I N_p \quad (1)$$

Burada B_T , Δl , μ_0 , I ve N_p sırasıyla manyetik akı yoğunluğunu, iletken uzunluğunu, havanın geçirgenliğini, akımı ve verici bobin sarım sayısını göstermektedir. Zamanla değişen manyetik alan bobinler arasındaki manyetik kuplajdan dolayı alıcı bobinde Faraday yasasına göre ve Denklem (2)'de gösterildiği gibi gerilim indüklenmesini sağlar.

$$E = -N_s \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

Eşitlikte E indüklenen gerilimi, Φ_B manyetik akıyı ve N_s ikincil sargıların sarım sayısını ifade etmektedir. Manyetik alan, frekansla orantılı olduğundan yüksek frekanslarda daha güçlü bir manyetik alan oluşması ve gücün daha uzak mesafelere taşınması sağlanabildiği için EGA yüksek frekanslarda gerçekleştirilir [16]. Ayrıca, EA'ların şarj edilebilmesi için oluşturulacak devrenin endüktif yapısı ve büyük hava boşluğu nedeniyle, ikincil bobine kuplajla bağlanacak gerekli manyetik alanı üretmek için yüksek bir akım gerekir. Bu nedenle, birincil dönüştürücünün reaktif gücünü en aza indirmek ve ikincil bobine güç aktarım kapasitesini artırmak için birincil ve ikincil taraf kompanse edilmektedir. EGA, kaynaktan alıcıya güç aktarımını çok çeşitli güç seviyelerinde gerçekleştirebilir [6].



Şekil 2. EGA yönteminin genel yapısı

Şekil 2'de bir EGA yönteminin genel yapısı verilmiştir. L_p ve L_s verici ve alıcı bobinler, C_p ve C_s kompanzasyon kapasitörleridir. M karşılıklı endüktansı gösterirken, Φ_{11} ve Φ_{12} sırasıyla birincil ve ikincil taraflar için kaçak akıyı ifade etmektedir. Sistemin kuplaj katsayısı (k) Denklem (3)'de verilmiştir.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (3)$$

EGA sistemleri, bobinler arasındaki mesafenin yakın ve uzak olmasına göre iki ana gruba ayrılır. Gevşek kuplajlı sistemlerde bobinler arası mesafenin fazla olmasından dolayı kaçak akı miktarı fazladır. Özellikle, EA şarj uygulamaları bu grupta değerlendirilmektedir [7]. Orta ve düşük güçlü EA şarj uygulamaları için gevşek kuplajlı bir EGA sisteminin bağlantı katsayısı değeri 0.1 ila 0.3 arasında değiştiğinden, sistemi rezonansa çalıştırmak için kompanzasyon kapasitörleri eklenerek, yüksek verimli ve yanlış hizalamaya daha toleranslı bir alıcı bobin elde edilebilir. Seri RLC devresi için rezonans frekansı Denklem (4) ve (5)'de gösterilmektedir.

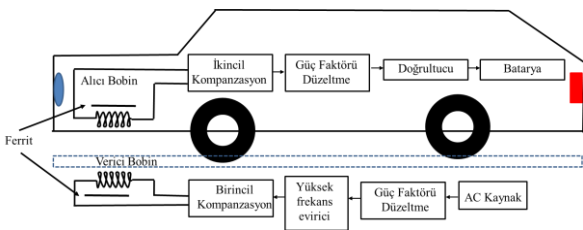
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Burada f_0 , verici veya alıcı bobinlerin rezonans frekansdır ve L ve C sırasıyla bobinlerin öz endüktans ve rezonans kapasitör değerleridir. Verici ve alıcı bobinlerin rezonans frekansları eşleştiği durumlarda verimli güç aktarımı mümkündür. Bobinlerin kuplaj performansı, kuplaj katsayısına (k), kalite faktörüne (Q) ve yanlış hizalama toleransına bağlıdır. Q , Denklem (6) kullanılarak hesaplanabilir. L , verici ve alıcı bobinin öz endüktansı, R bobinlerin direnci ve f ise L 'nin frekansdır. [6].

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \quad (6)$$

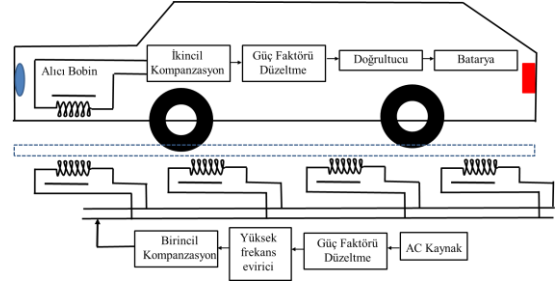
EA'lar için statik EGA temel blok diyagramı Şekil 3'de gösterilmektedir. AC güç kaynağından beslenen sistemde, doğrultucunun çıkışı DC gerilimdir ve zamanla değişen bir manyetik alan oluşturmak için AC gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Çıkışında evirici kullanılarak yüksek frekanslı AC çıkış elde edilir. Verici bobinden akan akım, zamanla değişen bir manyetik alan oluşturur ve bu da alıcı bobinde bir gerilim indüklenmesini sağlar. Elde edilen gerilim, doğrultucu yardımıyla doğrultulur ve akım sistemin çıkışına bağlı olan bataryayı şarj eder [17].



Şekil 3. Statik EGA şarj yapısı

Araç hareket halindeyken şarj etme yöntemi olan dinamik şarj, araçların maliyetini ve ağırlığını azaltır. Dinamik şarj, statik şarja göre daha az batarya boyutu gerektirir veya aynı boyuttaki bataryaya ile araç menzilin artırır [18]. Aracın hareket halinde olması, ihtiyaç duyulan yüksek güç dönüştürme sistemi için vericiler ve alıcılar

arasındaki etkileşimin kısa süreli olmasını sağlar. Ayrıca, yanlış hizalama toleransı yüksek olmalıdır. Şekil 4'de gösterildiği gibi, dinamik şarjda bobinler küçük parçalar veya uzun yol serileri halinde düzenlenebilir.



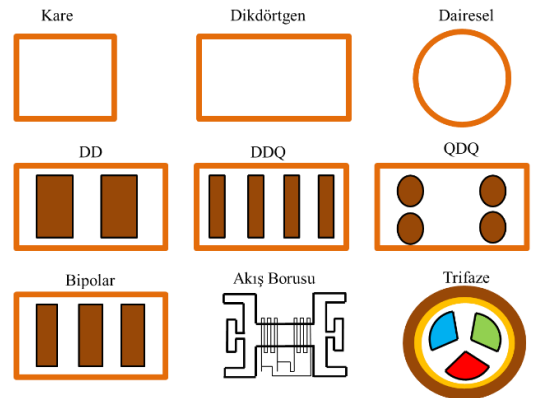
Şekil 4. Dinamik EGA şarj yapısı

Güç aktarma mesafesi, sistemin gücü, endüktans ve kalite faktörü gibi bağlantı parametreleri, frekans, bobin tasarımı, kompanzasyon topolojisi ve hizalama gibi faktörlerin sistemin performansı üzerinde dolaylı veya doğrudan etkileri vardır [18]. Etkili güç aktarımı için verimliliği etkileyen bu faktörler optimize edilmelidir.

2.1 EGA bobin yapıları

EGA'da kullanılan kuplaj pedleri, Şekil 5'de gösterildiği gibi farklı şekillerde bobin yapıları, manyetik akıyı eşit şekilde dağıtmak için ferromanyetik bir çekirdek ve manyetik alana maruz kalma düzeyini azaltmak için manyetik korumadan oluşur [6].

Güç aktarma mesafesi, güç değeri, endüktans ve kalite faktörü gibi bağlantı parametreleri, uygun havalandırma, yanlış hizalama toleransı, maliyet, bobin yapısının tasarlanmasında belirleyici faktörlerdir [19, 20]. Şekil-5'de farklı bobin tasarımları gösterilmektedir.



Şekil 5. Kuplaj pedlerinde kullanılan farklı bobin yapıları

Kuplaj pedleri, polarize pedler ve polarize olmayan pedler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Polarize pedler, akımın dikey ve paralel bileşenlerini oluşturmak için çoklu bobinlerden oluşturulur. Buna karşılık, polarize olmayan pedler, akımın yalnızca dikey bileşenlerini üretmek için tek bobin şeklinden yapılıdır [21, 22].

Polarize olmayan pedler, dairesel, kare, dikdörtgen ve altıgen gibi geleneksel şekilli bobinlerdir. Dairesel bobinler,

statik kablosuz güç aktarımı için uygundur. Keskin kenarlarının olmaması nedeniyle düşük kaçak akıya, kompakt ve esnek tasarıma ve düşük girdap akımına sahiptir fakat daha az hizalama toleransı sağlar [23]. Kare ve dikdörtgen şekilli bobinlerin, keskin köşe kenarları girdap akımı oluşturup empedansı artırdığı için endüktansı artırır. Bu durum, yüksek güçlü uygulamalar için dezavantajdır. Dikdörtgen şekilli bobinler, dairesel ve kare bobinlere kıyasla daha fazla yanlış hizalama toleransı gösterirler. Bununla birlikte, altıgen bobin şekilleri, verici ve alıcı bobinlerin merkezi konumunda maksimum güç aktarım verimliliği sunar [24].

Polarize olmayan pedlerin yanlış hizalamadaki düşük performans nedeniyle, çeşitli şekillerde polarize pedler sunulmuştur [25]. Akış borusu bobini, yüksek k değerini ve hizalama toleransına sahiptir. DD bobinler, kenarda minimum sızıntı akıları ile yalnızca bir yönde akı oluşturan iki kare veya dikdörtgen bobinden oluşturulur. DD bobinin üstünlükleri, gelişmiş kalite faktörü, daha yüksek yanlış hizalama toleransı, düşük alüminyum ekranlama kaybı, daha yüksek bağlantı katsayısı ve düşük akı sızıntısıdır [26].

DD bobinine bir Q bobini eklenerek oluşan DDQ bobini, hizalama probleminde performans artış sağlamaktadır. DDQ pedlerde trifaze sistem kullanılması güç aktarım yoğunluğunu artırır, üniform akış sağlar ve iletim mesafesini artırır [5]. DDQ bobininde bakır kullanımını azaltmak için bipolar ped yapısı sunulmuştur. Bipolar bobinin maliyeti ve karmaşıklığı yüksektir [27]. QDQ pedleri, önemli ölçüde daha yüksek bir bağlantı katsayısı ve yanlış hizalama toleransı sunar [15]. Sistemin performansı, farklı yapılarla sahip, yani W, I, E, U, S, vb. şekillerde ferromanyetik malzeme ile iyileştirilebilir.

2.2 EGA elektromanyetik koruma

EGA yönteminde yüksek güçlü kablosuz şarj işleminin frekans seviyesi 20 kHz-200 kHz arasındadır ve sistem çevresinde yüksek seviyede manyetik alanlar oluşur. Bu nedenle, yüksek frekanslı bir güç aktarım sisteminde uluslararası standartlar tarafından bildirilen güvenlik limitleri aşılabılır ve yüksek oranda manyetik alana maruz kalınabilir. EA şarj yapısının tasarımı, kaçak manyetik alanı izin verilen seviyelere indirmek için uluslararası standartlarla uyumlu olmalıdır. Bu nedenle kablosuz şarj sistemlerinde pasif koruma, aktif koruma ve reaktif koruma gibi farklı manyetik koruma çeşitleri kullanılır [5].

Pasif korumada, manyetik kalkan, pede takılan ferrit (manyetik çekirdek) ile sağlanır. Ferrit sistem kullanımında performans artarken ağırlık ve maliyet de artar. İletken pasif korumada, alüminyum levha manyetik alana yerleştirilerek girdap akımları indüklenir ve girdap akımları tarafından yeni bir manyetik alan üretilir. Bu, sistemin etrafındaki net alanın azaltılmasına yardımcı olur. Bu yöntemin dezavantajları, metalik plaka üzerinde büyük manyetik alan kaybı oluşması ve girdap akımlarının kontrol edilememesidir [28]. Alüminyum, uygun maliyeti ve bulunabilirliği nedeniyle uygulamalarda pasif koruyucu malzeme olarak kullanılır. Geleneksel pasif koruma kullanarak yüksek güç uygulamalarında kaçak elektromanyetik alanı yönetmek zordur. Aktif korumada, sızıntı alanını en aza indirmek için

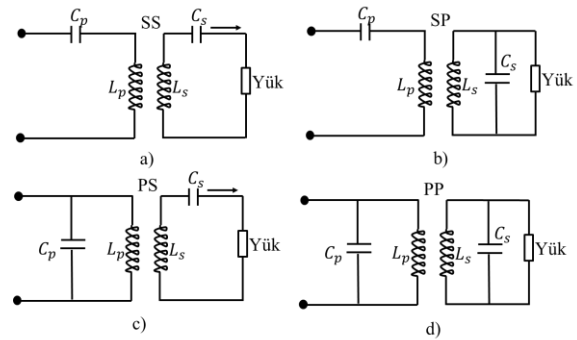
kuplör tarafından oluşturulan orijinal manyetik alana ters yönde bir manyetik alan oluşturmak için ters yönde koruyucu bobinler sarılır. Bu koruma yöntemi için ekstra güç kaynağı gerekmektedir [29]. Reaktif korumada ise farklı sayıda kapasitörlü bobinler kullanılmaktadır [30].

Yüksek frekans değerleri akımın iletken kesitinden değil yüzeyden akmasına neden olur ve bu durum deri etkisi olarak tanımlanır. Özellikle frekans değerleri yüksek olan çalışmalarda bobin olarak litz tel kullanımı tercih edilmektedir. Böylece akımın iletken kesiti boyunca eşit dağılımı sağlanmakta ve deri etkisi azaltılabilmektedir [31].

2.3 EGA kompanzasyon topolojileri

EGA yönteminde yüksek kalite faktörlerinin elde edilebilmesi ve maksimum güç aktarımının sağlanabilmesi için kompanzasyon sistemleri birincil ve ikincil taraftaki bobinlere entegre edilir [32]. EA'lara uygulanan EGA yönteminde kompanzasyon topolojileri genelde rezonans frekansında gerçekleştirilir. Rezonans devreleri; aktarılan gücü en üst düzeye çıkarma, iletim verimliliğini optimize etme, akım veya gerilim kaynağı gibi belirli bir kaynak karakteristiği oluşturma, verici bobinindeki mıknatıslanma akımını dengeleme ve yüksek harmonileri bastırma gibi işlevler görürler [33].

Mono-rezonans topolojileri alıcı ve verici taraftaki birer kapasitörden oluşur. Kapasitör bağlantıları seri veya paralel olabilir [6, 34]. Mono-rezonans topolojileri Seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-seri (PS) ve paralel-paralel (PP) olmak üzere dört çeşittir ve bu topolojiler Şekil 6' da gösterilmektedir.



Şekil 6. Seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-seri (PS) ve paralel-paralel (PP) kompanzasyon topolojileri

PS ve PP kablosuz şarj istasyonunda, alıcı tarafta bobin yoksa kaynak bobinin çalışmasını engeller. Bu durum güvenliği sağlasa da, verici ve alıcı uygun şekilde konumlandırılmadığında sistem yeterli gücü aktaramaz [35]. Ani gerilim değişimleri nedeniyle için girişlerinde akım kaynağı kullanılır. Akım kontrolünü daha kolay gerçekleştirmek için topolojiye endüktans eklenebilir. [36, 37]. Yaygın uygulamalarda, iyi verimlilik sağladıkları için SS ve SP topolojileri uygulanır. SS ve SP topolojilerin avantajı, kapasitans değerinin yük değişimine bağlı olmamasıdır. Öte yandan, SP topolojisi kuplaj katsayısına bağlıdır ve güçlü bir manyetik kuplaj için birincil kapasitans değerinin daha büyük olması gerekir [31].

Tablo 1. EA'ların EGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

Ref.	Yıl	Frekans (kHz)	Güç (kW)	Mesafe (mm)	Bobin Yapısı	Topoloji	Verim (%)
[38]	2021	85	0.2	100	Altgen	SS	80
[39]	2015	160	1	203.2	Kare	SS	93.7
[40]	2020	85	0.5	-	Dairesel	LCC	95.5
[41]	2016	90	3.3	200	İçiçe	LLC-LC	96.6
[42]	2020	85	3	300	Bipolar	Hybrid	92.5
[43]	2017	100	19.95	300	Kare	SP	80.3
[44]	2016	20.15	1	156	Daire	SS	96
[45]	2018	25		1000	Dikdörtgen	SP	88

SP topolojisinde birincil tarafa aktarılan empedans karşılıklı endüktansın karesi olması nedeniyle uygulanması çok zordur [5]. SS topolojisinde karşılıklı kuplaj ve yükler, kaynakların veya alıcıların rezonans frekanslarını etkilemez ama ikincil ve ana bobinlerin öz endüktansına bağlıdır. Bu durum, dinamik şarj için önemli olan yüksek hizalama toleransı sağlar. Bu tür sistemler, rezonans frekanslarında aktif güç çekerek birim güç faktörünü koruyabilir. SS topolojisi, hücreye tutarlı bir gerilim ve akım sağlayabildiğinden, bataryayı şarj etmek için daha güvenilir bir yöntemdir [15].

Yukarıda bahsedilen temel kompanzasyon topolojileri ideal koşullar için uygundur. Yanlış hizalama, frekans sapması vb. faktörler kablosuz şarj uygulamasının ideal koşullarda çalışmamasına neden olur. Literatürde temel topolojilerin yanı sıra farklı topolojilerin avantajlarını bir araya getirmek için önerilen hibrit topolojiler de bulunmaktadır. Bu hibrit topolojilerin de birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır [46]. Hibrit topolojiler, yanlış hizalamaya karşı sistem verimliliğini artırma, çok rezonanslı olma, çatallanmayı azaltma, birden fazla aracı şarj etme ve çift yönlü sistemlerin uygulanabilmesi gibi başka ek avantajlar da sunmaktadır [47, 48]. EA'ların EGA yöntemi ile kablosuz şarjı için en popüler hibrit yapılar LCL ve LCC topolojileridir [34]. LCL topolojisinin avantajları akım kaynağı olarak çalışması, harmonik filtreleme yeteneği sağlaması ve yüksek verim sağlamasıdır [49]. S-LCL, LCL-S, LCL-P ve çift LCL gibi çeşitleri vardır. LCC topolojisi, yüksek yanlış hizalama toleransı, yüksek verimlilik, elektromanyetik girişimin azaltılması ve yükten bağımsızlık gibi özelliklerinden dolayı avantajlıdır [50, 51]. S-LCC, LCC-S ve LCC-LCC gibi topolojiler LCC tabanlı topolojiler kategorisinde yer almaktadır.

2.4 EGA eviriciler

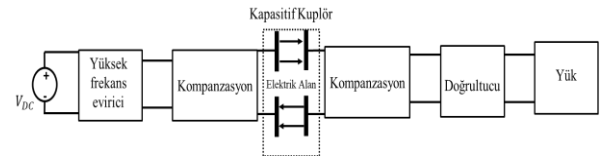
Kablosuz şarj sistemlerini tasarlarken frekans, güç ve verimlilik temel tasarım öğeleridir. Seçilen frekans değerine göre bobin boyutları azaltılabilir fakat bu durum anahtarlar kayıplarının artmasına neden olur. İşlemler için kullanılan çeşitli frekans aralıkları iki bantta yoğunlaşmıştır. Önceki çalışmaların çoğunda çalışma frekansı olarak 20 kHz seçilse de SAE j2954'e göre çalışma frekansının 85 kHz olması önerilmiştir [52]. Bu frekanslarda çalışmak için genelde

MOSFET ve IGBT kullanılır. Kablosuz şarj sisteminde güç aktarımı frekansla orantılıdır. IGBT'ler kablosuz şarj işleminde anahtarlama sıklığını artırmaktadır. Bu durum kayıplar ve ısınma sorunu yaratır. Öte yandan, konvansiyonel silikon MOSFET'ler düşük güç seviyesine sahiptir [53].

Dinamik şarj sistemlerinde yolda konumlandırılmış verici bobinlerinin sayısı, tek veya birden fazla evirici tarafından enerjilendirilebilir. Evirici, doğru akımı yüksek frekanslı alternatif akıma dönüştürür. Bu dönüştürme genellikle tam köprü evirici kullanılarak gerçekleştirilir [46-49]. Şarj cihazı çift yönlü olacak şekilde tasarlanmışsa, güç dönüştürücüler de çift yönlü olacak şekilde tasarlanmalıdır [54]. Tablo-1'de EA'ların EGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalarda ele alınan farklı parametreler verimlilik değerleri ile verilmiştir.

3 Kapasitif güç aktarımı (KGA)

Bir KGA sistemi, verici (birincil) ve alıcı (ikincil) taraftan oluşur. Verici taraf, yüksek frekanslı bir evirici ve birincil kompanzasyon sistemi ile temsil edilir. İkincil taraf, ikincil kompanzasyon sistemi, doğrultucu ve yük ile gösterilmektedir. Kapasitif kuplör, bir güç akışı döngüsü sağlayan bir ortamdır. Birincil ve ikincil rezonans bileşenleri için AC uyarımı sağlamak için yüksek frekanslı bir evirici kullanılır. Yükü DC beslemek için nihai olarak bir doğrultucu kullanılır. Bir KGA sisteminin genel şeması Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. KGA genel yapısı

Kapasitif kuplajın en önemli faydalarından biri ferrit çekirdek gerektirmemesidir. Bunun sonucu olarak daha düşük ağırlık, kayıplar ve maliyetle daha yüksek güç yoğunluğu sağlar. Dezavantajı, ise plakaların yakınında başka materyallerin olması, güç aktarımında ciddi sapmalara neden olur. Ayrıca, plakaların yakınında bulunmak ciddi sağlık sorunlarına yol açan elektromanyetik alanlara maruz

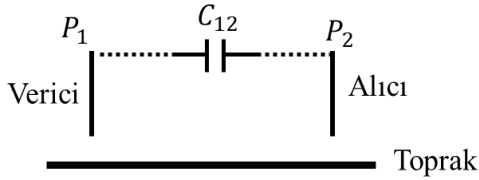
kalmaya neden olur. Bu nedenle, KGA genellikle düşük güçlü uygulamalarda kullanılır [55]. Son zamanlarda, EGA ve KGA birlikte kullanıldığı yeni bir yaklaşım da vardır. Bu hibrit sistemler, araç park halindeyken EGA ile hareket halinde şarj için KGA ile şarj olacak şekilde tasarlanmıştır [56]. KGA'da verimi artırmak için farklı kuplör yapıları, kompanzasyon topolojileri ve eviriciler kullanılır.

3.1 KGA kuplör yapıları

Kapasitif kuplör, gücü aktarmak ve elektrik alanları oluşturmak için kullanılan çok sayıda metal plakalardan oluşur. Her plaka çifti arasında kuplaj kapasitansları vardır ve kapasitif kuplörün farklı yapıları ile farklı kuplaj modelleri elde edilebilir. İki plakalı, dört plakalı, altı plakalı yapılar en çok kullanılan yapılarıdır [12].

3.1.1 İki plakalı yapı

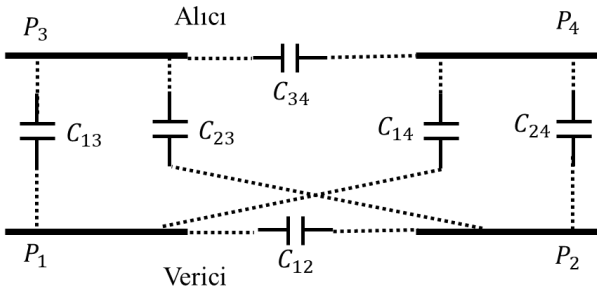
Şekil 8'de gösterilen iki plakalı yapıda bir plaka vericiye ve diğer plaka alıcıya bağlanır. İki plakalı yapıya sahip bir KGA sisteminin ana avantajı, basitleştirilmiş donanımdır [57].



Şekil 8. İki plakalı KGA genel yapısı

3.1.2 Dört plakalı yapı

KGA'nın en yaygın plaka yapısı dört plakalı yapıdır. Dört plakalı yapı, iki ana kuplaj kapasitansı ve dört kaçak kapasitans oluşur. Şekil 9'da gösterildiği gibi paralel iki plaka çiftinden oluşur. Plakalar birbirine yakın yerleştirildiğinde ve iyi hizalandığında, ana kaplin ortaya çıkan kapasiteye hakim olacaktır. İyi hizalanmadığında veya büyük hava boşluğu olduğunda daha düşük bir kapasitif kuplaj kalitesine neden olur [58].

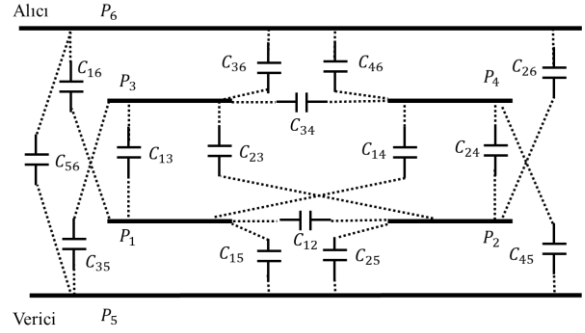


Şekil 9. Dört plakalı KGA genel yapısı

3.1.3 Altı plakalı yapı

Şekil 10'da gösterildiği gibi altı plakalı yapı, aslında iki büyük levhannın koruyucu kısmı ile uzatılmış dört levhali paralel bir kuplaj yapısıdır. Dört plaka birincil ve ikincil arasında güç aktarımı sağlar ve doğrudan kompanzasyon devrelerine bağlanır. İki ekstra koruyucu plaka, içteki dört

plakalı bağlantı yapısını kaplayacak kadar büyüktür ve sisteme doğrudan bağlı değildir. Ekstra koruyucu parçanın asıl amacı elektrik alan emisyonlarını azaltmaktır [59].



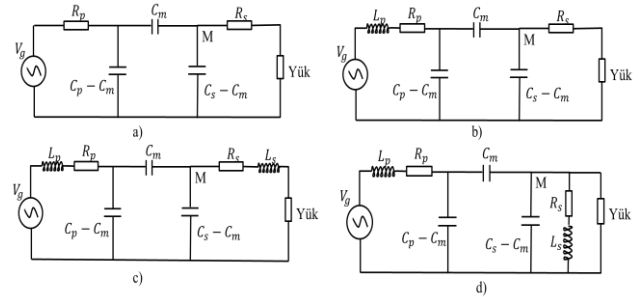
Şekil 10. Altı plakalı KGA genel yapısı

Bunlar dışında, matris yapı, konsantrik yapı ve elektrik alan tekrarlayıcı gibi yapılarda KGA yönteminde farklı kuplaj tasarımları kullanılmaktadır [60].

3.2 KGA kompanzasyon topolojileri

KGA sistemlerinin en önemli dezavantajı, plakalar arasındaki düşük kuplaj kapasitansıdır. Bu kadar düşük kuplaj kapasitanslarında etkili bir güç aktarımı gerçekleştirmek için birincil tarafı besleyen gerilimin frekansı ve/veya büyüklüğü artırılabilir. Ancak bu durumda yüksek frekanslar dönüştürücüde önemli kayıplara neden olur. Bu nedenle KGA sistemlerinde verici ve alıcı tarafında kompanzasyon sistemleri kullanılır [10]. İndüktör kompanzasyon sistemi, yüksek ve düşük güç uygulamalarında basit ve yaygın olarak kullanılır ve L kompanzasyon sistemi olarak da adlandırılır.

L kompanzasyon sistemi rezonansız, birincil rezonans, ikincil rezonans, SS ve SP olarak yaygın olarak kullanılan kompanzasyon topolojileridir [53, 61]. Şekil 11'de, L kompanzasyon topolojileri gösterilmektedir. SS devresi, verici plakasında yüksek gerilim elde etmek için gerekli olan rezonansa gerilim kazancı sağlarken, SP devresi yükü beslemek için akım kazancı sağlar. İkincil rezonans için L bobini, yükü seri olarak sekonder tarafa yerleştirilir.



Şekil 11. a) Rezonansız b) birincil rezonans c) SS d) SP kompanzasyon topolojileri

KGA sisteminde, kullanılan eviricilere bağlı olarak farklı kompanzasyon topolojilerini uygulanır. Köprü eviricileri kullanan KGA sistemleri için, genellikle rezonans topolojileri uygulanmaktadır.

Tablo 2. EA'ların KGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

Ref.	Yıl	Frekans (kHz)	Güç (kW)	Mesafe (mm)	Plaka sayısı	Topoloji	Verim (%)
[62]	2020	1000	1.5	150	4	LCL-L	85.5
[63]	2018	1000	1.97	150	6	LCL-LCL	91.6
[57]	2018	6780	0.35	110	2	LC-LC	74.1
[64]	2019	600	1	150	4	LC-CLC	90.5
[58]	2015	1000	2.4	150	4	LC-LC	90.8

Rezonans topolojisi, sürücü tarafından üretilen yüksek dereceli harmonikleri filtreleyerek, anahtarlar için yumuşak geçiş elde ederek sistem performansını iyileştirmede önemli bir rol oynar. KGA'da başka birçok yapıda kompanzasyon topolojileri uygulanmıştır; çift taraflı LC, çift taraflı LCC, çift taraflı LCLC, çift taraflı LCL, çift taraflı CLLC, LCLC-LC, LC-CLC, LCL-L [10, 65–68]. Bunlar arasında, LC tipi, bu topolojileri oluşturmak için kullanılan temel biçimdir ve çok aşamalı LC yapısı, gerilimi artırmak, iletim verimliliğini artırmak vb. gibi farklı amaçlara ulaşmak için kullanılabilir.

3.3 KGA eviriciler

KGA'nda kullanılan eviriciler PWM dönüştürücü, güç yükseltici ve tam köprü tabanlı sistemler olarak sınıflandırılırlar. PWM evirici, yanlış hizalama nedeniyle kuplaj kapasitesinin değişmesi veya verici ile alıcı arasındaki mesafenin değişmesi gibi sistem parametrelerinin varyasyonlarına karşı daha az duyarlıdır [69]. Bu dönüştürücüler yüksek anahtarlama frekanslarında çalışacak şekilde tasarlanabilir. Bu, sistem verimliliğini artırır ve bileşenlerin boyutunu azaltır. Güç amplifikatörü tabanlı dönüştürücülerin ana dezavantajı, sistem parametre değişikliklerine olan duyarlılığıdır [70]. Tam köprü evirici kolay parametre tasarımı ve sağlamlığı nedeniyle en yaygın eviricidir [71]. Tam köprü eviricinin diğer evirici topolojilerine kıyasla anahtarlama bileşenleri üzerinde yüksek giriş gerilimleri sağlayabilmektedir.

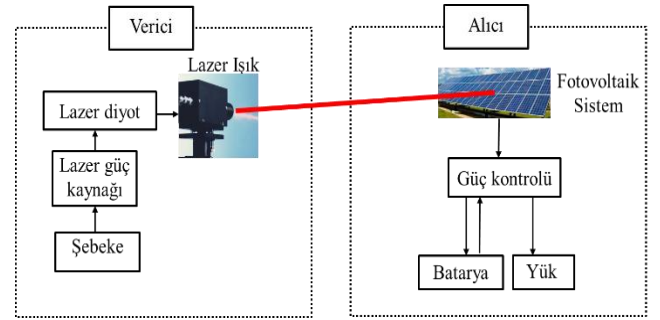
Tablo-2'de EA'ların KGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalarda ele alınan farklı parametreler ve verimlilik değerleri verilmiştir.

4 Optik (Lazer) güç aktarımı (OGA)

Günümüzde EA'ların kablosuz şarjı için yüksek güç dönüştürme verimlilikleri nedeniyle EGA ve KGA üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Fakat bu yöntemlerin iletim mesafesi kısadır ve bu yöntemlerde EA'larda bulunan bobinler, yol şeritlerinin altına gömülü olan şarj pedlerine yakın olmalıdır [72]. EGA ve KGA teknolojilerinin aksine OGA yöntemi ile kilometre ölçeğindeki mesafelere güç aktarımı sağlanabilir.

Şekil 11'de görüldüğü gibi, sistemin vericisi ortak bir kaynaktan gelen gücü bir lazer aracılığıyla tek renkli bir ışık huzmesine dönüştürür. Bu lazer ışını daha sonra bir dizi optikle şekillendirilir ve bir ışın yönlendirici aracılığıyla uzaktaki fotovoltaik (FV) alıcısına yönlendirilir. Alıcıda, lazer dalga boyu ve ışın yoğunluğuyla eşleşen özel PV

hücreleri, lazer ışığını tekrar elektrige dönüştürür. OGA sistemi, herhangi bir miktardaki gücü uzaydaki herhangi bir noktaya iletme yeteneğine sahiptir ancak, kaynakta ve alıcıdaki dönüştürme verimliliği gibi uygulamadaki sınırlamalar, sistemin performansını düşürür [72].



Şekil 11. OGA genel yapısı

Elektrik gücü, uyarıcı akım ve gerilimine bağlı olan güç tedarikçisi tarafından sağlanır [73]. Lazer gücü, ancak uyarıcı akım belirli bir eşeğin üzerinde olduğunda üretilebilmektedir. Lazer iletiminde güç zayıflama seviyesi, iletim mesafesine ve hava kalitesine bağlıdır [74]. Alıcıda lazer gücü elektrik gücüne dönüştürülür. Lazerden elektrige dönüştürme mekanizmasını göstermek için, bir PV panelinin tek diyotlu eşdeğer devre modelinden faydalanılır [75]. Yüksek güçlü lazerle ilgili en önemli sorun; göz güvenliğidir. Lazer, insan gözüyle görülemeyen kızılötesine yakın dalga boyunda çalışır. Bu nedenle, lazer ışımına doğrudan bakmak ve yansımalara maruz kalmak retina hasarına neden olabilir [76]. Bir diğer sorun cilt yanması ve yangın riskidir. Doğrudan ışına veya yansımaya maruz kalma, doku yanmasına neden olabilir. Diğer taraftan lazer ışını yanıcı bir malzemeyle temas ettiğinde yangın çıkmasına neden olabilir. Tablo-3'de EA'ların OGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalarda kullanılan parametreler ve verimlilik değerleri sunulmuştur.

5 Mikrodalga güç aktarımı (MGA)

MGA yönteminde mikrodalga, yüksek gerilimli bir DC jeneratörü tarafından çalıştırılan bir manyetro tarafından üretilir. Sinyal üretici, düşük güçlü mikrodalga sinyalleri üretmek için kullanılır ve güç amplifikatörü, yüksek güçlü mikrodalga sinyalleri çıkarmak için üretilen küçük sinyalleri yükseltir.

Tablo 3. EA'ların OGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

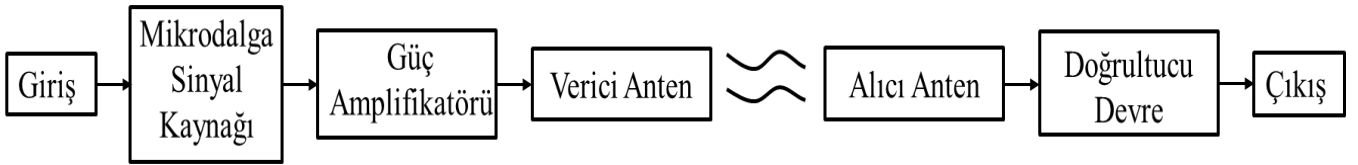
Ref.	Yıl	Frekans	Güç(kW)	Mesafe (mm)	Hız (m/s)	Verim (%)
[73]	2021	3.7 GHz	0.0625	50000	N/A	12.5
[76]	2019	N/A	10	150	3	87
[77]	2019	400 kHz	1.6	N/A	9	87.4
[78]	2012	N/A	0.04	N/A	27	45
[79]	2019	50 Hz	0.15	N/A	25	N/A

Tablo 4. EA'ların MGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

Ref.	Yıl	Frekans	Güç	Mesafe (mm)	Verim (%)
[80]	2018	10 GHz	N/A	23	N/A
[81]	2019	14.5 GHz	13	250	N/A
[82]	2019	77 Ghz	9	15000	N/A

Tablo 5. EA'ların kablosuz şarjında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

	EGA	KGA	OGA	MGA
Güç Seviyesi	0-30 kW	0-2.5 kW	0-20 kW	0-10 kW
Frekans	20-200 kHz	1kHz-20 MHz	300 MHz-1THz	300 MHz-300GHz
Mesafe	0-300 mm	0-150 mm	0 -100 km	0 -100 km
Verim	80-96	45-93	15-78	10-87
Elektromanyetik Girişim	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
Tehlike durumu	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Maliyet	Orta	Düşük	Yüksek	Yüksek
Dinamik Şarja Uygunluk	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Çift Taraflı Güç Akışı	Evet	Evet	Hayır	Hayır



Şekil 12. MGA genel yapısı

Daha sonra verici anten tarafından yayılır. Verici anten, yayılan gücü toplama bölgesine yönlendirebilecek şekilde tasarlanabilir [83]. Bunun için vericide bir faz kaydırma dizisi kullanılır. Ardından alıcı, mikrodalga sinyalini DC sinyaline dönüştürmek için bir alıcı anten kullanır. DC çıkış EA bataryasına aktarılarak şarj işlemi gerçekleştirilir. MGA genel yapısı Şekil 12'de gösterilmiştir [34].

Çalışma frekansı, frekans kaynağının nominal frekans değeridir ve taşıyıcı frekansı olarak da adlandırılır.

Elektromanyetik dalgaların frekansı ne kadar yüksekse, yönlendirilmeleri o kadar iyi ve mekansal zayıflama o kadar az olur [84]. Güç amplifikatörünün ana işlevi, küçük sinyalleri yükseltmektir. Bir güç amplifikatörü, bir KGA'nın önemli bir bileşenidir ve verimliliği, sistemin iletim verimliliğini doğrudan etkiler. Sistem performansı tamamen verici ve alıcı anten performansına ve karşılıklı eşleşmeye bağlıdır. Verici ve alıcı antenlerin teknik indeksleri esas olarak empedans ve yön özellikleridir. Hareketli hedefler

için mikrodalga kablosuz güç iletim sisteminde, verici anten, ışın yönünün ve ışın gücünün kontrolünü gerçekleştirmek için hedefin hareket durumuna göre ışının iletim yönünü değiştirmelidir [85]. Doğrultucular için verimlilik, doğrultucu diyotun karakteristik parametreleri, DC yükü ve empedans uyumu derecesi ile ilgilidir [83]. Tablo-4’de MGA yöntemi ile ilgili çalışmalar sunulmuştur.

6 Kablosuz güç aktarım yöntemlerinin EA’ların şarjı açısından karşılaştırılması

Tablo-5’de EA’ların kablosuz şarj edilebilmeleri için kullanılan kablosuz güç aktarım yöntemleri olan EGA, KGA, OGA ve MGA yöntemleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu yöntemlerden EGA ve KGA yöntemi kısa mesafelerde kullanılabilirken OGA ve MGA daha uzun mesafelerde de kullanılabilir. OGA ve MGA daha uzun mesafelerde de kullanılabilir.

Sunulan yöntemlerden en olgunlaşmış olan ve güncel olarak kullanılabilir yöntem endüktif güç aktarım yöntemidir. KGA yöntemleri içerisinde en düşük mesafede kullanılabilir yöntemdir. Bunun yanında, KGA diğer kuplaj teknolojili EGA ile karşılaştırıldığında daha düşük maliyet, hafiflik, daha düşük girdap akımı kaybı, daha yüksek güvenilirlik ve daha düşük elektromanyetik girişim avantajlı yönleridir. EGA yönteminde elektromanyetik girişimin önlenmesi için ferrit çekirdek ve alüminyum tabaka gibi ekranlama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu da sistemin ağırlığını artırırken maliyetin de artmasına neden olmaktadır. EGA yöntemi ile 30 kW’a kadar etkili güç aktarımı yapılabilirken, KGA sisteminde aktarılabilir güç seviyesi çok daha düşüktür. KGA’da verimlilik hava boşluğuna bağlı olarak %45’lere kadar düşebilmektedir. EGA için ise verimlilik %80 ila %96 arasında değişmektedir. EGA genelde 20 kHz -200 kHz arasında uygulanırken, KGA 1 kHz-20 Mhz arasındaki frekanslarda gerçekleştirilir. EGA ve KGA yöntemleri dinamik şarj yöntemleri için uygun olup, araçtan şebekeye güç aktarımına da kullanılabilir.

OGA ve MGA, EA’ların şarjı için henüz olgunlaşmamış fakat bu alanda yapılan araştırmalar son yıllarda hız kazanmaktadır. Hem OGA hem de MGA, birkaç kilovattlık gücü birkaç metreden birkaç kilometreye kadar aktarma yeteneğine sahiptir. OGA yönteminde lazerin verimli atmosferik yayılma özelliği ve daha büyük miktarlarda güç iletmeye yeteneği, onu MGA teknolojisinden ayırmaktadır. Uzak mesafe verimlilikleri MGA için %10 civarı iken, OGA için %20 civarındadır. Her iki yöntemde yüksek frekanslarda çalıştırılırken MGA’nın sağlık açısından elektromanyetik etkisi daha yüksektir. OGA yönteminde ise dikkatli yeterli önlem alınmazsa göz veya deri için olumsuz etkiler oluşabilir. Bu yöntemlerin EA’ların dinamik şarjında kullanılması için çalışmalar olsa da henüz dinamik şarj için elverişli değildir ve maliyetleri yüksektir.

7 Sonuç

Bu çalışmada, EA’ların kablosuz şarjına yönelik kapsamlı bir genel bakış sunulmaktadır. Kablosuz şarj türlerinden biri olan dinamik şarj, EA’ların daha düşük batarya kapasiteleri ile daha uzun menzile sahip olmalarına olanak sağlamaktadır. Bu durum, EA’ların en önemli maliyet kalemi olan batarya maliyetinin düşmesini sağlamaktadır. Kablosuz şarj teknolojilerden EGA ve KGA yöntemleri

yakın mesafe, OGA ve MGA yöntemleri ise uzak mesafe güç aktarım teknolojileri olarak öne çıkmaktadır. Genel olarak bir EA’nın kablosuz şarjına etki eden en önemli faktörler güç, mesafe ve frekanstır. EGA yönteminde bobin tasarımları, kompanzasyon teknolojisi, elektromanyetik koruma, yanlış hizalama, evirici gibi etkenler de şarj verimini etkilemektedir. KGA yönteminde ise farklı olarak bobin tasarımı yerine plaka yapıları ve hava boşluğu etkinliği etkileyen önemli faktörlerdir. KGA yöntemi, EGA’ya göre düşük mesafe ve güçlerde etkili olabilmektedir. KGA ve EGA yöntemleri, EA’ların dinamik şarjı için uygun yöntemlerdir ve pratik olarak uygulamaları da hayata geçmeye başlamıştır. Diğer taraftan, OGA ve MGA yöntemleri genelde uzak mesafeler için tercih edilmektedir. EA uygulamaları için erken dönem araştırma safhasındadır ve verimlilikleri oldukça düşüktür. OGA ve MGA yöntemleri çok yüksek frekanslarda çalıştığı için insan sağlığı için tehlike arz edebilmektedir. Bu iki yöntemin dinamik şarjda kullanımı için çalışmalar olsa da uygulanabilirliği düşüktür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] EPA-US, Transportation greenhouse gas emissions. <http://large.stanford.edu/courses/2021/ph240/jo2/docs/epa-21.pdf>, Accessed 21 August 2023.
- [2] S. Alshahrani, M. Khalid, and M. Almuhamdi, Electric vehicles beyond energy storage and modern power networks: Challenges and applications. *IEEE Access*, 7, 99031–99064, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928639>.
- [3] G. Kim, I. Ashraf, J. Eom, and Y. Park, Optimal path configuration with coded laser pilots for charging electric vehicles using high intensity laser power beams. *Appl. Sci.*, 11(9), 1-22, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11093826>.
- [4] P. Machura and Q. Li, A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 104, 209–234, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.027>.
- [5] A. Mahesh, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles-a review. *IEEE Access*, 9, 137667–137713, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116678>.
- [6] C. Panchal, S. Stegen, and J. Lu, Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 21 (5) 922–937, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- [7] E. Aydın, M. T. Aydemir, A. Aksoz, and M. El Baghdadi, Inductive power transfer for electric vehicle charging applications: a comprehensive review. *Energies*, 15 (14), 1-24, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15144962>.
- [8] F. Durmuş and S. Karagöl, The effect of the wireless power transfer for electric vehicles on state of charge.

- Eur. J. Sci. Technol. 26, 447–455, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.960364>.
- [9] A. A. S. Mohamed, A. Meintz, and L. Zhu, System design and optimization of in-route wireless charging infrastructure for shared automated electric vehicles. *IEEE Access*, 7, 79968–79979, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920232>.
- [10] Z. Wang, Y. Zhang, X. He, B. Luo, and R. Mai, Research and application of capacitive power transfer system: a review. *Electronics*, 11, 1158. 20 22. <https://doi.org/10.3390/electronics11071158>
- [11] J. Dai and D. C. Ludois, A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (11) 6017–6029, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2415253>
- [12] F. Lu, H. Zhang, and C. Mi, A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology. *Energies*, 10, 1-20, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10111752>.
- [13] C. G. Colombo, S. M. Miraftabzadeh, A. Saldarini, M. Longo, M. Brenna, W. Yaici, Literature review on wireless charging technologies: future trend for electric vehicle. *Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology*, pp. 1-5, Cassino, Italy, 23-25 November 2022. <https://doi.org/10.1109/SMART5.2022.9990331>
- [14] L. Sun, D. Ma, and H. Tang, A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 91, 490–503, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.016>.
- [15] K. A. Kalwar, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, Coil design for high misalignment tolerant inductive power transfer system for ev charging. *Energies*, 9 (11), 1-13, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9110937>.
- [16] H. Chen, Y. Xiao, Basic principles of wireless power transfer and comparisons between electromagnetic induction and microwave wireless charging. *Int. Conf. Appl. Phys. Comput.*, pp. 104–106, Ottawa, Canada, 08-10 September 2022. <https://doi.org/10.1109/ICAPC57304.2022.00026>.
- [17] A. A. S. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally, and S. I. Selem, A comprehensive overview of inductive pad in electric vehicles stationary charging. *Appl. Energy*, 262, 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114584>.
- [18] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, C. T. Rim, Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 3 (1), 18–36, 2015. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2343674>.
- [19] H. Feng and R. Tavakoli, Advances in high-power wireless charging systems: overview and design considerations. *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 6 (3), 886–919, 2020. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3102543>.
- [20] A. Ahmad, M. S. Alam, A. A. S. Mohamed, Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application. *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 5 (4), 934–945, 2019. <https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2929443>.
- [21] G. Palani, U. Sengamalai, P. Vishnuram, and B. Nastasi, Challenges and barriers of wireless charging technologies for electric vehicles. *Energies*, 16, 1-15, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16052138>
- [22] A. C. Bagchi, A. Kamineni, R. A. Zane and R. Carlson, Review and comparative analysis of topologies and control methods in dynamic wireless charging of electric vehicles. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 9 (4), 4947–4962, 2021. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3058968>.
- [23] G. R. Nagendra, G. A. Covic, and J. T. Boys, Determining the physical size of inductive couplers for IPT ev systems. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 2 (3) 571–583, 2014. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2302295>.
- [24] W. Chen C. Liu, C. H. T. Lee, Z. Zhan, Cost-effectiveness comparison of coupler designs of wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging. *Energies*, 9, 1-21, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9110906>.
- [25] K. Aditya, V. K. Sood, and S. S. Williamson, Magnetic characterization of unsymmetrical coil pairs using archimedean spirals for wider misalignment tolerance in ipt systems. *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 3 (2) 454–463, 2017. <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2673847>.
- [26] A. A. S. Mohamed, S. An, and O. Mohammed, Coil design optimization of power pad in IPT system for electric vehicle applications. *IEEE Trans. Magn.*, 54 (4), 1–5, 2018. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2784381>.
- [27] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C. Y. Huang, Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60 (1), 318–328, 2013. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2179274>.
- [28] M. Mohammad et al., Design of an EMF suppressing magnetic shield for a 100-kW DD-coil wireless charging system for electric vehicles. *Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 1521–1527, Anaheim, CA, USA, 17-21 March 2019. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8722084>.
- [29] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, and M. Feliziani, Active coil system for magnetic field reduction in an automotive wireless power transfer system. *2019 Int. Symp. Electromagn. Compat. Signal Power Integrity*, pp. 189–192, New Orleans, LA, USA, 22-26 July 2019. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2019.8825202>.
- [30] E. Asa, M. Mohammad, O. C. Onar, J. Pries, V. Galigekere and G. J. Su, Review of safety and exposure limits of electromagnetic fields in wireless electric vehicle charging (wevc) applications. *2020 Transp. Electrification Conf. Expo, Chicago, IL, USA, 23-26 June 2020*. <https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020>.

- 020.9161597.
- [31] V. Shevchenko et al, Compensation topologies in ipt systems: standards, requirements, classification, analysis, comparison and application. *IEEE Access*, 7, 120559–120580, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937891>.
- [32] H. Li, Y. Liu, K. Zhou, Z. He, W. Li, and R. Mai, Uniform power IPT system with three-phase transmitter and bipolar receiver for dynamic charging. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (3), 2013–2017, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2864781>.
- [33] F. Musavi, M. Edington, and W. Eberle, Wireless power transfer: a survey of ev battery charging technologies. *IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 1804–1810, Raleigh, NC, USA, 15-20 September 2012. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342593>.
- [34] J. M. González-gonzález and J. A. Aguado, Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: a review. *Energies*, 14, 1-18, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061547>
- [35] P. Vishuram, P. Suresh, R. Narayanamoorthi, K. Vijayakumar, B. Nastasi, Wireless chargers for electric vehicle: a systematic review on converter topologies, environmental assessment, and review policy. *Energies*, 16, 1-17, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16041731>.
- [36] A. J. Moradewicz and M. P. Kazmierkowski, Contactless energy transfer system with fpga-controlled resonant converter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57 (9), 3181–3190, 2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2051395>.
- [37] W. Zhang, and C. C. Mi, Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 65 (6), 4768–4778, 2016. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2454292>.
- [38] P. Tan, T. Peng, X. Gao, and B. Zhang, Flexible combination and switching control for robust wireless power transfer system with hexagonal array coil. *IEEE Trans. Power Electron.*, 36 (4), 3868–3882, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3018908>.
- [39] E. Asa, K. Colak, M. Bojarski, and D. Czarkowski, A novel multi-level phase-controlled resonant inverter with common mode capacitor for wireless ev chargers. *Transp. Electrification Conf. Expo*, pp. 1–6, Dearborn, MI, USA, 14-17 June 2015. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2015.7165734>.
- [40] A. Ramezani and M. Narimani, Optimized electric vehicle wireless chargers with reduced output voltage sensitivity to misalignment. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 8 (4), 3569–3581, 2020. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2958932>.
- [41] S. C. Moon and G. W. Moon, Wireless power transfer system with an asymmetric four-coil resonator for electric vehicle battery chargers. *IEEE Trans. Power Electron.*, 31 (10), 6844–6854, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2506779>.
- [42] J. Zhou, P. Yao, K. Guo, P. Cao, Y. Zhang, and H. Ma, A heterogeneous inductive power transfer system for electric vehicles with spontaneous constant current and constant voltage output features. *Electron.*, 9 (11), 1–20, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9111978>.
- [43] Z. Dai, J. Wang, M. Long, and H. Huang, A witrlicity-based high-power device for wireless charging of electric vehicles. *Energies*, 10 (3), 1-24, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10030323>.
- [44] H. Kim et al., Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 64 (2), 383–400, 2016. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2513394>.
- [45] I. Villar, A. Garcia-Bediaga, U. Iruretagoyena, R. Arregi, and P. Estevez, Design and experimental validation of a 50kw IPT for railway traction applications. *Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 1177–1183, Portland, OR, USA, 23-27 September 2018. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8558441>.
- [46] M. Zucca et al., Assessment of the overall efficiency in wpt stations for electric vehicles. *Sustainability*, 13, 1–19, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13052436>
- [47] N. A. Keeling, G. A. Covic, and J. T. Boys, A unity-power-factor IPT pickup for high-power applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57 (2), 744–751, 2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2027255>.
- [48] C. Wang, G. A. Covic, O. H. Stielau, Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications *IEEE Trans. Power Electron.* 19 (4), 995–1002, 2004. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.830098>.
- [49] B. Esteban, M. Sid-ahmed, N. C. Kar, and A comparative study of power supply architectures in wireless ev charging systems. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (11), 6408–6422, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2440256>.
- [50] N. Rasekh, J. Kavianpour, and M. Mirsalim, A novel integration method for a bipolar receiver pad using LCC compensation topology for wireless power transfer. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 67 (8), 7419–7428, 2018. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2837348>.
- [51] T. Kan, T. Nguyen, J. C. White, R. K. Malhan, and C. C. Mi, A new integration method for an electric vehicle wireless charging system using LCC compensation topology: analysis and design. *IEEE Trans. Power Electron.*, 32 (2), 1638–1650, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2552060>.
- [52] J. M. González-González, A. Triviño-Cabrera, and J. A. Aguado, Design and validation of a control algorithm for a SAE J2954-compliant wireless charger to guarantee the operational electrical constraints. *Energies*, 11, 1-25, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11030604>.
- [53] D. Rozario, N. A. Azeez, S. S. Williamson, Comprehensive review and comparative analysis of compensation networks for capacitive power transfer systems. *Int. Symp. Ind. Electron*, pp. 823–829, Santa Clara, CA, USA, 08-10 June 2016, <https://doi.org/10.1109/ISIE.2016.7744996>.

- [54] Q. Deng et al., Modeling and control of inductive power transfer system supplied by multiphase phase-controlled inverter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (9), 9303–9315, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2886846>.
- [55] C. H. Lin et al., Comprehensive analysis of IPT v/s CPT for wireless ev charging and effect of capacitor plate shape and foreign particle on CPT. *Processes*, 9, 1-25, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9091619>.
- [56] B. Luo, T. Long, L. Guo, R. Dai, R. Mai, and Z. He, Analysis and design of inductive and capacitive hybrid wireless power transfer system for railway application. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 56 (3), 3034–3042, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979110>.
- [57] F. Lu, C. C. Mi., A two-plate capacitive wireless power transfer system for electric vehicle charging applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33 (2), 964–969, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2735365>.
- [58] F. Lu et al. Double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (11), 6011–6014, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2446891>.
- [59] H. Zang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu and C.C. Mi, Six-plate capacitive coupler to reduce electric field emission in large air-gap capacitive power transfer. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33 (1), 665–675, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2662583>
- [60] C. Lecluyse, B. Minnaert, M. Kleemann, A review of the current state of technology of capacitive wireless power transfer. *Energies*, 14, 1-25, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14185862>
- [61] S. Ahmad, R. Hattori, A. Muharram, Generalized circuit model of shielded capacitive power transfer. *Energies*, 14, 1-18. 2021. <https://doi.org/10.3390/en14102826>
- [62] V. B. Vu, M. Dahidah, V. Pickert, and V. T. Phan, An improved lcl-l compensation topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging. *IEEE Access*, 8, 27757–27768, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971961>.
- [63] H. Zhang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu, and C. C. Mi, Six-plate capacitive coupler to reduce electric field emission in large air-gap capacitive power transfer. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33 (1), 665–675, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2662583>.
- [64] B. Luo, R. Mai, L. Guo, D. Wu, and Z. He, LC–CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance. *IET Power Electron.*, 12 (10), 2626–2633, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5606>.
- [65] S. K. Mishra, R. Adda, S. Sekhar, A. Joshi, and A. K. Rathore, Power transfer using portable surfaces in capacitively coupled power transfer technology. *IET Power Electron.*, 9 (5), 997–1008, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0332>.
- [66] J. Lian, X. Qu, An LCLC-LC-compensated capacitive power transferred battery charger with near-unity power factor and configurable charging profile. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 58 (1), 1053–1060, 2022. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3089448>
- [67] D. A. I. Xin and S. U. N. Min, Generalized hamiltonian energy modeling method for wireless power transfer system. 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong, China, 07-10 December 2020. <https://doi.org/10.1109/PESA50370.2020.9344047>.
- [68] J. Lian and X. Qu, Design of a double-sided LC compensated capacitive power transfer system with capacitor voltage stress optimization. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, 67 (4), 715–719, 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2918648>.
- [69] J. Dai, and D. C. Ludois, Single active switch power electronics for kilowatt scale capacitive power transfer. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 3 (1), 315–323, 2015. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2334621>.
- [70] A. S. Haritha and J. K. Jose, A reliable inverter for wireless power transfer applications. *Int. Conf. Circuits Syst. Digit. Enterp. Technol.* pp 1–5, Kottayam, India, 21-22 December 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCSDET.2018.8821139>
- [71] C. Jiang, K. T. Chau, C. Liu, C. H. T. Lee, An overview of resonant circuits for wireless power transfer, *Energies*, 10 (7), 1-22, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10070894>.
- [72] D. H. Nguyen, Dynamic optical wireless power transfer for electric vehicles. *IEEE Access*, 11, 2787–2795, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234577>.
- [73] A. Mohammadnia, B. M. Ziapour, H. Ghaebi, and M. H. Khooban, Feasibility assessment of next-generation drones powering by laser-based wireless power transfer. *Opt. Laser Technol.*, 143, 1-8, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107283>.
- [74] Q. Zhang, W. Fang, Q. Liu, J. Wu, P. Xia, and L. Yang, Distributed laser charging: a wireless power transfer approach. *IEEE Internet Things J.*, 5 (5), 3853–3864, 2018. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2851070>.
- [75] K. Jin and W. Zhou, Wireless laser power transmission : a review of recent progress. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (4), 3842–3859, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2853156>
- [76] Y. Rathod and L. Hughes, Simulating the charging of electric vehicles by laser. *Procedia Comput. Sci.*, 155, 527–534, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.073>.
- [77] K. J. Pai, Temperature rise effects on dynamic resistances for laser diodes with a wavelength of 450 nm for vehicle headlight applications. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 68 (10), 9529–9542, 2019. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2929225>.
- [78] V. A. Bogushevskaya et al., An experimental investigation of the feasibility of using silicone and gallium arsenide solar batteries on space vehicles for receiving energy of laser infrared emission. *Therm. Eng.*, 59 (13), 975–980, 2012. <https://doi.org/10.1>

- 134/S0040601512130034.
- [79] U. F. Shaikh, A. Das, A. Barai, and I. Masters, Electrothermo-mechanical behaviours of laser joints for electric vehicle battery interconnects. 2019 Electr. Veh. Int. Conf. EV 2019, pp. 1–6, Bucharest, Romania, 03-04 October 2019. <https://doi.org/10.1109/EV.2019.8892972>.
- [80] T. Li et al., A novel design of microstrip patch antenna array with modified-I-shaped electromagnetic metamaterials applied in microwave wireless power transmission. *Optik (Stuttg.)*, 173, 193–205, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.08.012>.
- [81] W. Li, R. Li, J. Dong, J. Yang, and X. Zhang, Demonstration of a microwave photonic radar for high-resolution vehicle sar/isar imaging. *Int. Top. Meet. Microw. Photonics*, pp. 1–3, Ottawa, Canada, 07-10 October 2019. <https://doi.org/10.1109/MWP.2019.8892002>.
- [82] J. D. Castro, S. Singh, A. Arora, S. Louie, and D. Senic, Enabling safe autonomous vehicles by advanced mm-wave radar simulations. *MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1476–1479, Boston, MA, USA, 02-07 June 2019. <https://doi.org/10.1109/mwsym.2019.8700843>.
- [83] C. Wang, W. Xu, C. Zhang, M. Wang, and X. Wang, Microwave wireless power transmission technology index system and test evaluation methods. *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 16, 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1186/s13634-022-00846-7>.
- [84] C. Wang, W. Xu, C. Zhang, M. Wang, X. Wang, Microwave wireless power transmission technology index system and test evaluation methods. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 16, 1–11, 2022. <https://doi.org/10.1186/s13634-022-00846-7>.
- [85] I. Ahmed, E. A. Elghanam, M. S. Hassan, and A. Osman, Study of the feasibility of using microwave power transfer for dynamic wireless electric vehicle charging. *Transp. Electrif. Conf. Expo*, pp. 365–370, Chicago, IL, USA, 23-26 June 2020. <https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020.9161475>.





Şistlerin dayanım anizotropisinde sıcaklık ve pH'nın etkisi

The effect of temperature and pH on the strength anisotropy of schists

Mehmet Özdemir^{1,*}, Sunay Beyhan², Kaan Erarslan³

^{1,2,3}Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya, Türkiye

Öz

Madencilik çalışmaları proje süreçlerinde kayaç dayanımı önemli bir parametredir. Sedimanter ve metamorfik kayaçlar gibi dayanım anizotropisi açısından yönelimlere göre farklı dayanım özellikleri gösteren kayaçlarda dayanım değerleri dağılımı önem arz etmektedir. Bunun birlikte farklı sıcaklıklarda ve pH'larda çalışmalar yapılabilmektedir. Yaz, kış, asidik ve bazik ortamlarda dayanım değerleri değişebilmektedir. Bu çalışmada Türkiye Kastamonu ili Hanönü ilçesindeki bakır madeninden şist numuneleri alınmıştır. Yeşil şist ve mika şist gibi metamorfik kayaçların dayanım anizotropisinin yanında farklı sıcaklık (5°C ve 35°C) ve pH'larda (2, 7 ve 12) dayanım değerlerinin değişimi incelenmiştir. Genel olarak her iki kayaç için 15°-45° derecelerde minimum dayanımlar, 60°-90° dereceler arasında ise maksimum sonuçlar elde edilmiştir. Genellikle her iki kayaç 5°C'de maksimum dayanım dağılımı göstermiştir. Mika şist için pH parametresinde maksimum dayanım pH12'de, diğer pH'larda yakın dağılım, yeşil şist için ise tüm pH değerlerinde benzer dağılım elde edilmiştir. Mika şist için derece, sıcaklık ve pH parametreleri, yeşil şist için ise derece ve sıcaklık parametreleri dayanımda etkili olmuştur. Kayaçlarda farklı parametrelerin değişiminin dayanıma etkisinin incelenmesi proje ve işletme süreçlerinde katkı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Anisotropy, Mika şist, pH, Sıcaklık, Yeşil şist

1 Giriş

Yeraltı ve yerüstü mühendislik yapılarının duraylılığında kayacın dayanım anizotropisi önemli bir parametredir. Bu parametre özellikle sedimanter ve metamorfik kayaçlarda daha çok önem taşımaktadır. Foliasyon, şistozite, klivaj ve tabakalı yapılarından dolayı dayanım anizotropisi oluşmaktadır [1,2]. Şist, fillit, gnays, kayrak taşı, şeyl ve benzeri metamorfik ve sedimanter kayaçlarda bu durum çoğunlukla gözlemlenmektedir [3-5].

Dayanım anizotropisinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda genellikle yüklem eksenine göre 0° ile 90° arasındaki farklı derecelerde alınmış karot numunelerinden yararlanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda genellikle maksimum dayanımlar 90°'de, 30° ile 45° arasında ise minimum dayanımlar elde edilmektedir [6]. Bu değerler kayaç türlerine göre değişebilmektedir.

Abstract

Rock strength is an important parameter in mining project processes. The distribution of strength values is important in rocks showing different strength properties according to orientations in terms of strength anisotropy, such as sedimentary and metamorphic rocks. The studies can be carried out at different temperatures and pHs. Strength values may change in summer, winter, acidic and basic conditions. In this study, schist samples were taken from the copper mine in the Hanönü district of Kastamonu, Türkiye. Besides the strength anisotropy of metamorphic rocks such as green schist and mica schist, the variation of strength values at different temperatures (5°C and 35°C) and pH (2, 7 and 12) was investigated. In general, minimum strengths at 15°-45° and maximum results between 60°-90° degrees were obtained for both rocks. Generally, both rocks showed maximum strength distribution at 5°C. Maximum strength was obtained at pH12 for mica schist, close distribution at other pH values, and similar distribution at all pH values for green schist. The degree, temperature, and pH parameters affected the strength of mica schist, while the degree and temperature parameters were effective in the strength of green schist. Examination of the effect of the change of different parameters on the strength of the rocks will contribute to the project and operation processes.

Keywords: Anisotropy, Mica schist, pH, Temperature, Green schist

Nasseri vd. [7] tarafından Himalaya klorit şist ve kuvars mika şiste uygulanan dayanım testi deneylerinde 90°'de maksimum, 30°-45° arasında ise minimum dayanımlar elde edilmiştir. Bu sonuçların dağılımında tabakalardaki şistozite düzlemleri ve mineralizasyonun etkili olduğu ifade edilmiştir. Zhang vd. [8] kuvars-mika şiste uyguladıkları tek ve üç eksenli dayanım testlerinde şistoziteye paralel yönde daha çabuk çatlakların oluştuğu ve bu durumun bu kısımlardaki mineral birikiminden kaynaklandığını dile getirmişlerdir. Song vd. [9] 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 90°'deki kömür numunelerine yaptıkları deneylerde 0° için maksimum, 45°'de minimum dayanımlar gözlemlenmişlerdir. 0°'de 45°'ye kıyasla daha az süreksizlik düzlemlerinin olması bu durumun sebebi olarak belirtilmiştir. Togashi vd. [10] farklı derecelerdeki (0°, 15°, 30° ve 90°) tüf numunelerinin deformasyon davranışı belirlemişlerdir. Tek ve üç eksenli dayanım testlerindeki deformasyon

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmet.ozdemir@dpu.edu.tr (M. Özdemir)
Geliş / Received: 01.06.2023 Kabul / Accepted: 07.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1308451

değerlerinin tabakalanmaya dik ve paralel yönde farklı olduğu ifade edilmiştir. Bunun sebebi olarak asal birim deformasyonların tabakalanma yönünde daha fazla oluşmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Li vd. [11] asidik ortamda bulunan kumtaşlarında farklı sıcaklık (25°C, 50°C ve 75°C) ve kırılma dayanımlarında (5, 10 ve 15 MPa) hasar karakterini tespit etmeye çalışmışlardır. Düşük sıcaklıklarda (25°C) tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin ve Young Modüllerinin daha düşük değerlerde olduğu saptanmıştır. Zhao vd. [12] termal enerji deposunda kullanılacak granitin farklı sıcaklıklarda mekanik davranışını araştırmışlardır. Buna göre; 600°C'de minimum dayanım, 100°C'de ise maksimum dayanımlar elde edilmiştir. Li vd. [13] granit kayacının jeotermal işlemlerde kullanılabilirliğini 20°C-600°C değerleri arasında test etmişlerdir. Düşük derecelerde (20°C) daha yüksek dayanım ve Elastisite Modülü değerleri, yüksek sıcaklıklarda ise daha düşük dayanım ve Elastisite Modülü değerleri olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun farklı sıcaklıklardaki numunelerde kristal yapının ve mikro çatlak yapısı gelişiminin farklı şekilde gelişmesinden kaynaklandığı şeklinde ifade edilmiştir. Hu vd. [14] granit kayacının 20°C-600°C arasındaki çekme dayanımını, P dalga hızını ve bu değerlerin birbiriyle olan ilişkilerini tespit etmeye çalışmışlardır. Sıcaklık artışı ile buharlaşma etkisi sonucunda gözenek artışının daha fazla olduğunu ve mikro çatlak gelişiminin daha yüksek oranda olmasını P dalga hızının azalması ile tespit etmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda P dalga hızı ve çekme dayanımı değerlerinde bu sebeplerle düşüşler oluşmuştur. Wang vd. [15] şeyl kayacına benzer ve farklı oranda mineraller ile oluşturulmuş kayaca benzer numuneler ile 20°C, 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C ve 0, 1, 3, 5 ve 7 MPa yanıl basınçlarda yaptıkları dayanım deneylerinde benzer şekilde yüksek sıcaklıklarda (50°C ve 60°C) dayanımlarda düşüşler oluşmuştur. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ile mikro çatlakların durumu incelenmiştir. Yüksek derecelerde ve farklı yanıl basınçlarda mikro çatlak gelişiminin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Pan vd. [16] Çin'in Macheng bölgesinden alınan granit kayaçlarına özel fırında 25, 150, 300, 450 ve 600°C'lerde ısıtıl işlem uygulayarak dayanım dağılımını incelemişlerdir. Düşük sıcaklıklardan (25°C) yüksek sıcaklıklara (600°C) doğru dayanımlarda önemli ölçüde azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Isıtıl işlem artışı ile porozite artışının fazla olmasından dolayı dayanımda düşüşler meydana gelmiştir. Zhang vd. [17] Çin, Amerika ve Almanya'dan alınan kumtaşlarına fırınlarda 20, 200, 400, 800°C'ler elde edilerek dayanım davranışlarını incelemişlerdir. Genel olarak yüksek ısılardaki kumtaşları dayanımının düşük ısılarla kıyasla daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bu düşüşlerin sebepleri olarak sıcaklık artışının kuvars ve kil minerallerini değiştirdiği ve porozitenin ve mikroçatlak oluşumunun sıcaklıkla artışı şeklinde ifade edilmiştir. Literatürdeki farklı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda [18-20] yüksek sıcaklıklarda gözenek ve mikro çatlak oluşumunun fazla olması dayanım düşüşlerine neden olduğu ifade edilmiştir.

Liu vd. [21] çimento, kuvars, alçıtaşı ve su ile oluşturdukları kayaç benzeri numuneleri pH2 ve pH4 şartlarında 60 ve 90 dakika bekleterek tek eksenli sıkışma

dayanım deneyleri uygulamışlardır. pH4'deki değerler pH2'ye göre daha yüksek olmuştur. pH2'deki yüksek asidik oranın kaya benzeri numunede daha fazla boşluk ve mikro çatlak oluşturduğu düşünülmektedir. Guo vd. [22] pH2, 7 ve 12 koşullarında bekletilen kumtaşı kayaçlarına yaptıkları üç eksenli sıkışma deneylerinde maksimum kesme dayanımı sonuçlarının benzer aralıklarda (4-11 MPa) olduğunu saptamışlardır. Singh vd. [23] mermer numunelerini pH1, 2, 4, 6, 7, 8, 10 ve 12 şartlarında 15 saat bekleterek çekme dayanımı, kesme dayanımı, nokta yük indeksi, tek eksenli sıkışma dayanımı ve P dalga hızı deneyleri uygulamışlardır. pH7 koşullarındaki dayanım değerlerinin asidik ve alkali koşullardaki sonuçlara kıyasla daha yüksek çıktığı belirtilmiştir. Mermerin bünyesindeki CaCO₃'tan dolayı asidik koşullarda reaksiyonlar oluşmakta ve boşlukları yaratmaktadır. Bu boşlukların dayanım değerlerini önemli ölçüde düşürdüğü ifade edilmektedir. Alkali koşullarda ise pH7 koşullarına göre daha düşük sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Ngo vd. [24] Vietnam'ın güneydoğu kısmı Binh Duong şehrindeki maden sahasından elde ettikleri uçucu kül ve alkali aktivatör solüsyonu zeminini pH4 ve pH6 koşullarında bekleterek uyguladıkları dayanım deneylerinde pH6 koşullarında daha düşük dayanımlar elde etmişlerdir. Dayanım değerlerinin Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sodyum Sülfid (Na₂SiO₃) çözeltilerindeki kür zamanlarına göre değiştiği vurgulanmıştır. Liu vd. [25] Çin'in Yunnan bölgesinden elde ettikleri dolomit örneklerine farklı pH'larda (1, 3, 5 ve 7) 21 güne kadar bekleterek uyguladıkları dayanım deneylerinde asidik koşullarda (pH 1 ve 3) daha düşük dayanımlarda sonuçlar oluşturmuşlardır. Karbonat içeren dolomit kayacı için asidik koşullarda çözünme reaksiyonlarının daha fazla mikro çatlakları artırarak dayanımı düşürdüğü ifade edilmiştir.

Literatürde farklı sıcaklık ve pH'larda şist numunelerinin dayanımlarına yönelik çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Bu çalışma ile farklı yönelim açıları, sıcaklık ve pH'lardaki yeşil şist ve mika şist numunelerinin dayanımları incelenerek proje ve araştırma sürecindeki çalışmalara katkı sunulacaktır. Sıcaklık ve pH aralıkları laboratuvar koşullarına göre oluşturulmuştur. Bu amaçla; Kastamonu İli Hanönü ilçesinde bulunan bakır madeninden 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° yönelime sahip yeşil şist ve mika şist numuneleri alınmıştır. Bu numunelere kuru ortam, 5°C ve 35°C ile pH2, pH7 ve pH12 koşullarında dayanım deneyleri uygulanarak mekanik davranışları belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

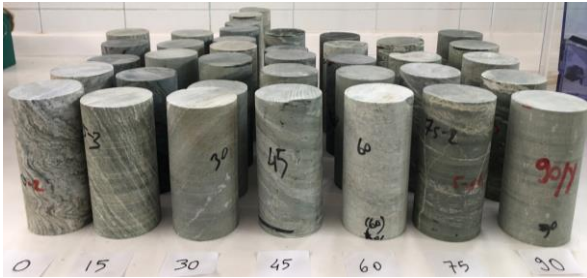
Yeşil şist ve mika şist numuneleri Kastamonu ili Hanönü ilçesinde bulunan bir bakır madeninden elde edilmiştir. Hanönü batısında Taşköprü ilçesi, doğusunda ise Sinop ili bulunmaktadır (kırmızı bölge). Türkiye'nin Kuzey kısmında yer almaktadır (Şekil 1).

Yeşil şist ve mika şist numuneleri 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'de ve HQ (63.5 cm) çapta alınarak deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 2). Dereceler yüklenme eksenine göre seçilmiştir. Yüklenme eksenine ve tabakalanma konumları arasında kalan açı (β) dayanım anizotropisinde anizotropik açı olarak kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 1. Hanönü ilçesi yer bulduru haritası

Yeşil şist ve mika şist numunelerinde karot boy (L)/çap (D) oranı ISRM [26] ve Tuncay ve Hasançebi [27] önerileri doğrultusunda 2-2.5 arasında seçilmiştir.

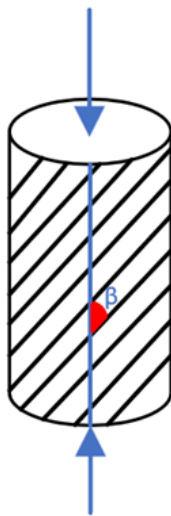


(a)



(b)

Şekil 2. Yeşil şist numuneleri (a) mika şist numuneleri (b)



Şekil 3. Anizotropik açı

Yeşil şist ve mika şistin fiziksel özelliklerinin belirlenmesine yönelik yürütülen deneysel çalışmalarda Tablo 1'de verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 1. Yeşil şist ve mika şistin fiziksel özellikleri [28]

Numune Türü	Kuru Yoğunluk (gr/cm ³)	Doğgun Yoğunluk (gr/cm ³)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Gözeneklilik (%)	Boşluk Oranı
Yeşil Şist	2.79	2.80	0.18	0.537	0.0054
Mika Şist	2.70	2.74	1.20	3.223	0.0336

Fiziksel özellik sonuçları incelendiğinde mika şist numunesinin gözeneklilik ve ağırlıkça su emme oranının yeşil şistten daha fazla olduğu görülmektedir (Tablo 1). Söz konusu bölgede daha önce yapılan bir çalışmada mika şist P ve S dalga hızının yeşil şistten düşük olduğu saptanmıştır [29]. Bu durumun, mika şistteki kırık, çatlak vb. jeolojik bozuklukların daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) incelemesinde ise mika şistte poroz ve fabrik yapının daha fazla oranda olduğu tespit edilmiştir. Bu durum su emme oranının fazla olmasına ve dayanımın azalmasında etkili olduğu belirtilmiştir [28]. Mika şist biriminin önemli bir fay zonu (Ekinveren) içerisinde yer almasından dolayı kırık ve çatlak yapısının fazla olduğu ve bu durumda kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilediği belirtilmektedir [30–32].

2.2 Metot

Dayanım deneylerinde 300 tonluk hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 4). Yükleme hızı olarak ISRM [26] yöntemlerinde tek eksenli sıkışma deneyleri için önerilen 0.5-1.0 MPa/sn değerleri uygulanmıştır. Deneysel çalışmada numuneler farklı sıcaklık ve pH değerlerinde koşullandırılmıştır. Buna göre; 5°C ve 35°C sıcaklık ile pH2, pH7 ve pH12 şartlarında deneysel çalışmalar yürütülmüştür.



Şekil 4. Tek eksenli sıkışma dayanımı test düzeni

Numunelerin 5°C ve 35°C'de elde edilebilmesinde 5°C için iklimlendirme cihazı, 35°C sıcaklığın sağlanabilmesi için ise su banyosu kullanılmıştır. İklimlendirme ve su banyosu cihazlarında sıvı ortamı olarak saf su kullanılmıştır. Numuneler değişmez kütleye gelinceye kadar saf su ortamında belirtilen sıcaklık değerlerinde bekletilmiştir. Bekleme süresi içerisinde cihazlardaki su seviyeleri kısa aralıklarla kontrol edilmiştir.

İklimlendirme cihazında-10.0°C+60.0°C arasında sıcaklık değerleri elde edilebilmektedir. Zamanlayıcı ve sıcaklık alarm aralığı özellikleri ile deneylerde kolaylık sağlanmıştır (Şekil 5). ±0,1°C hassasiyetinde cihaz çalışabilmektedir.



Şekil 5. İklimlendirme cihazı

Mika şist ve yeşil şist numunelerini 35°C sıcaklığa ulaştırabilmek için su banyosu kullanılmıştır. Su banyosu $\pm 0,1^\circ\text{C}$ doğruluğunda, 22 litre kapasiteli ve 20°C-99°C arasında sıcaklık sağlayabilen bir cihazdır. Sıcaklığın doğruluğunu kontrol edebilmek için termometre kullanılmıştır (Şekil 6). 35°C'de buharlaşma fazla olabileceği için sürekli gözlemler yapılmıştır. Saf su seviyesinin azaldığı koşullarda takviye sıvı kullanılmıştır.



Şekil 6. Su banyosu

Numune pH2 ve pH12 koşullarının sağlanabilmesi sırasıyla seyreltilmiş Hidroklorik Asit (HCl) ve Sodyum Hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmıştır. pH7 sıvı koşullarının sağlanabilmesi için ise saf su kullanılmıştır. pH değerlerinin sürekli sabit kalabilmesi için pH metre ile kontroller yapılmıştır. Artan veya azalan pH değerleri için seyreltilmiş Hidroklorik Asit (HCl) ve Sodyum Hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılarak pH değeri 2 ve 12 değerlerinde sabit tutulmaya çalışılmıştır (Şekil 7).



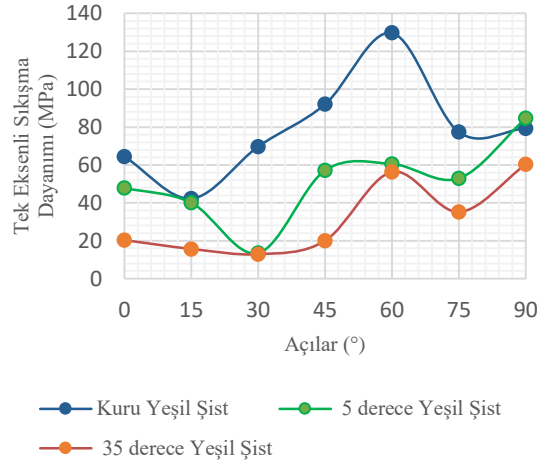
Şekil 7. Sıvı koşullarında pH kontrolü

3 Bulgular ve tartışma

Mika şist ve yeşil şist numuneleri için kuru ortam, 5°C ve 35°C ve pH2, pH7 ve pH12 şartlarında tek eksenli sıkışma dayanım deneyleri uygulanmıştır. Kuru ortam, 5°C ve 35°C şartlarında elde edilen sonuçlar Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur. Ayrıca numunelerin kuru ortam ve pH7 koşullarındaki değerleri için daha önce yapılan çalışmalardaki sonuçlardan yararlanılmıştır [28].



Şekil 8. Farklı sıcaklıklarda mika şist dayanımları



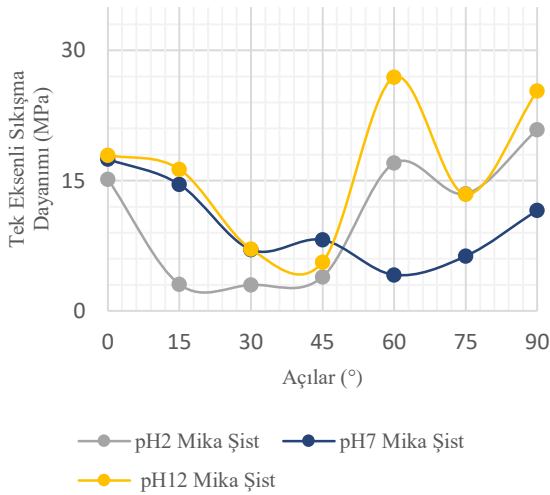
Şekil 9. Farklı sıcaklıklarda yeşil şist dayanımları

Yapılan çalışmalarda en yüksek tek eksenli basınç dayanımı genel olarak kuru numunelerde elde edilmiştir. Farklı su sıcaklıklarında koşullandırılmış numunelerde ise en yüksek dayanım 5°C'de koşullandırılmış numunelerde görülmüştür. 5°C'de genel olarak yüksek dayanımların elde edilmesinde buharlaşma ile gözenek ve mikro çatlak oluşumunun daha az oranda olması etkili olmuştur. Sıcaklığın dayanıma etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklıkların kayalarındaki kristal yapıyı değiştirdiği, gözenekleri ve mikro çatlakları artırdığı belirtilmektedir [13,14,16]. Ayrıca kayaç türüne bağlı olarak sıcaklık artışı ile minerallerdeki değişimin de dayanım düşüşlerinde etkili

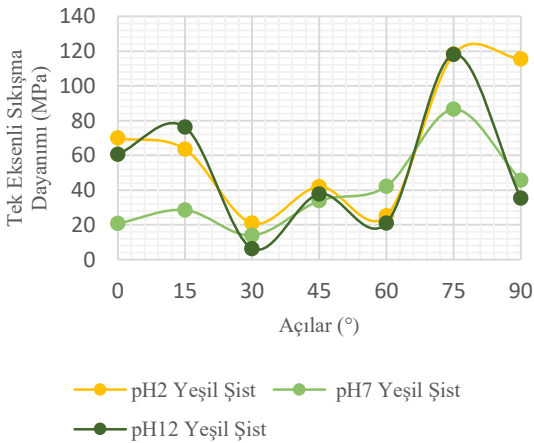
olduğu vurgulanmıştır [17]. Kayaçlardaki minerallerinde deneylerden önce ve sonra araştırılmasında fayda vardır. Dayanımın kuru numunelere kıyasla koşullandırılmış numunelerde düşük çıkmasında suyun etkisinin de göz ardı edilmemesi gerekir. Su taneler arasındaki bağı zayıflatmakta ve dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Su ile sıcaklıkta dayanımın azalmasında etkili olmuştur. Bu durum Şekil 8 ve Şekil 9'daki sonuçlarda görülmektedir.

Sıcaklık dışında diğer parametre olan anizotropik derecelerde ise her iki kayaç dayanım anizotropisi için yaklaşık olarak 15°-45° derecelerde minimum, 60°-90° dereceler arasında ise maksimum dayanım sonuçları elde edilmiştir. Literatürde belirtilen dereceler bazında (30°-45° minimum, 90° maksimum dayanım değerleri) dayanım dağılımlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir [33,34].

pH değerleri (2, 7 ve 12) farklı sıvı ortamlarında koşullandırılmış numunelerde elde edilen tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulmuştur. pH2 değeri için seyreltilmiş Hidroklorik Asit (HCl), pH12 değeri için seyreltilmiş Sülfirik Asit (H₂SO₄) çözeltileri ve pH7 ortamı için ise saf su kullanılmıştır.



Şekil 10. Farklı pH'larda mika şist dayanımları



Şekil 11. Farklı pH'larda yeşil şist dayanımları

Farklı pH değerlerinde koşullandırılmış numunelere uygulanan tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarına göre; genel olarak mika şist numunesinde en yüksek dayanımlar pH12'de görülmüştür. Diğer pH değerlerinde ise birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yeşil şist için tüm pH değerlerinde birbirine yakın sonuçlar oluşmuştur. Asidik ortamın kayaç ile tepkimeye girerek gözenek yapısını değiştirdiği ve bu durumun da dayanımı düşürdüğü ifade edilmektedir [21,23]. Yapılan çalışmada bu durum mika şist numunesinin pH2'de elde edilen deney sonuçlarında görülmektedir (Şekil 10). Ancak araştırmalarda kayaç ve zemin türüne ve bünyelerindeki minerallere bağlı olarak asidik ve bazik koşullarda minimum ve maksimum dayanımlar değişkenlik göstermektedir [24,25]. Her iki kayaç için anizotropik derecelerde yaklaşık olarak 15°-45° derecelerde minimum, 60°-90° dereceler arasında ise maksimum dayanım sonuçları oluşmuştur. pH parametresinde sıcaklık parametresindeki anizotropik derecelere benzer dayanım sonuçları dağılımı elde edilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada Kastamonu Hanönü ilçesi bakır madeninden alınan 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 90°deki mika şist ve yeşil şist numunelerine kuru, 5°C ve 35°C, pH2, pH7 ve pH12 ortamlarında dayanım deneyleri uygulanmış ve dayanım anizotropisine göre dereceler bazında sonuçlar irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1) Yeşil şist ve mika şist numunelerinde anizotropik dereceler için bütün koşullarda (pH ve sıcaklıklar) genel olarak 15°-45° derecelerde minimum, 60°-90° dereceler arasında ise maksimum dayanım sonuçları elde edilmiştir.

2) Her iki numune için kuru ortam hariç 5°C'de maksimum dayanım sonuçları oluşmuştur. Yüksek sıcaklık, dayanımın azalmasına neden olmuştur.

3) pH2, pH7 ve pH12 koşullarındaki şist numuneleri için, pH çoğunlukla mika şist numunesini etkilemiştir. Mika şist için, pH2 koşulunda ve 15° yönelim açısında en düşük, pH12 koşulunda ve 60° yönelim açısında ise en yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Yeşil şistte ise tüm pH değerlerinde sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, pH farklılıklarının yeşil şist numunesi üzerinde etkisinin az olduğu sonucuna varılmıştır. Mika şistte yapılacak çalışmaların farklı pH koşullarına göre değerlendirilmesi uygun olacaktır.

4) Dayanım anizotropisi gösteren sedimanter ve metamorfik kayaçlarda pH ve sıcaklık koşullarının da araştırılması mühendislik projelerine katkıda bulunacaktır.

5) Yeşil şist ve mika şist numunelerine dereceler bazında sık aralıkta (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) dayanımlar elde edilirken, sıcaklık (5°C ve 35°C) ve pH (pH2, 7 ve 12) parametreleri için laboratuvardaki koşullara göre daha az aralıkta veriler elde edilmiştir. Araştırmacılar bu aralıkları artırarak çalışmalarını daha detaylı hale getirebilir.

6) Yeşil şist ve mika şist numunelerine tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri uygulanarak değişik parametrelerde dayanım dağılımı incelenmiştir. Numunelere benzer veya farklı parametrelerde laboratuvar koşullarına göre üç eksenli sıkışma deneyleri uygulanarak kayaçların kesme dayanımları dağılımı incelenebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] K. Ullemeyer, S. Siegesmund, P. N. J. Rasolofosaon and J. H. Behrmann, Experimental and texture-derived P-wave anisotropy of principal rocks from the TRANSALP traverse: An aid for the interpretation of seismic field data, *Tectonophysics*, 414 (1–4), 97–116, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.10.024>.
- [2] R. Ajalloeian and G. R. Lashkaripour, Strength anisotropies in mudrocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59 (3), 195–199, 2000. <https://doi.org/10.1007/s100640000055>.
- [3] T. Ramamurthy, G. V. Rao and J. Singh, Engineering behaviour of phyllites, *Engineering Geology*, 33 (3), 209–225. 1993. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(93\)90059-L](https://doi.org/10.1016/0013-7952(93)90059-L).
- [4] A. Ghazvinian, R. Geranmayeh Vaneghi and M. R. Hadei, Behavior and failure mechanism of angoran schists under uniaxial compression loading. *ISRM Int. Symp. EUROCK 2012*, 28-30 May 2012, pp. 1–10, Stockholm, Sweden, 2012.
- [5] J. W. Cho, H. Kim, S. Jeon, and K. B. Min, Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 50, 158–169. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.12.004>.
- [6] H. Saroglou and G. Tsiambaos, A modified Hoek–Brown failure criterion for anisotropic intact rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45 (2), 223–234. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.05.004>.
- [7] M. H. B. Nasser, K. S. Rao and T. Ramamurthy, Anisotropic strength and deformational behaviour of Himalayan schists, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (1), 3–23, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00103-X).
- [8] X. P. Zhang, L. N. Y. Wong, S. J. Wang and G. Y. Han, Engineering properties of quartz mica schist, *Engineering Geology*, 121 (3–4), 135–149, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.020>.
- [9] H. Song, Y. Jiang, D. Elsworth, Y. Zhao, J. Wang and B. Liu, Scale effects and strength anisotropy in coal, *International Journal of Coal Geology*, 195 (March), 37–46, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.05.006>.
- [10] Y. Togashi, M. Kikumoto, K. Tani, K. Hosoda and K. Ogawa, Detection of deformation anisotropy of tuff by a single triaxial test on a single specimen, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108 (November 2017), 23–36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.054>.
- [11] S. Li, R. Huo, F. Yoshiaki, D. Ren and Z. Song, Effect of acid-temperature-pressure on the damage characteristics of sandstone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 122, 104079, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104079>.
- [12] G. Zhao, Y. Hu and P. Jin, Exploratory Experimental Study on the Mechanical Properties of Granite Subjected to Cyclic Temperature and Uniaxial Stress, *Energies*, 13 (8), 1–17, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13082061>.
- [13] C. Li, Y. Hu, T. Meng, P. Jin, Z. Zhao and C. Zhang, Experimental study of the influence of temperature and cooling method on mechanical properties of granite: Implication for geothermal mining, *Energy Science and Engineering*, 8(5), 1716–1728, 2020. <https://doi.org/10.1002/ese3.627>.
- [14] Y. Hu, Y. Hu, G. Zhao, P. Jin, Z. Zhao and C. Li, Experimental Investigation of the Relationships Among P-Wave Velocity, Tensile Strength, and Mode-I Fracture Toughness of Granite After High-Temperature Treatment, *Natural Resources Research*, 31(2), 801–816, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10020-3>.
- [15] H. Wang, Y. Wang and X. Fu, Experimental study on coupling influence of temperature and confining pressure to deformation and strength characteristics of rock-like material with pre-existing crack, *Materials*, 14 (24), 1–15, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14247572>.
- [16] J. Pan, Z. Feng, Y. Zhang, X. Xi, S. Miao and M. Cai, Experimental study on evaluation of porosity, thermal conductivity, UCS, and elastic modulus of granite after thermal and chemical treatments by using P-wave velocity, *Geoenergy Science and Engineering*, 230, 212184, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212184>.
- [17] J. Zhang, Y. Shen, G. Yang, H. Zhang, Y. Wang, X. Hou, Q. Sun and G. Li, Inconsistency of changes in uniaxial compressive strength and P-wave velocity of sandstone after temperature treatments, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13, 143-153, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.05.008>.
- [18] V. Vishal, S. P. Pradhan and T. N. Singh, Tensile Strength of Rock Under Elevated Temperatures, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29 (6), 1127–1133, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9440-y>.
- [19] W. Hongwei, G. Qiang, C. Lizhuang, W. Yongyan and L. Jianguang, Investigation of the Effect of Fissure Angle and Temperature on the Strength and Deformation of Rock-like Material. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, pp. 1–7, 2020.
- [20] A. Moslehy, K. A. Alshibli and T. J. Truster, Influence of Temperature and Crystal Orientation on Compressive Strength of Rock Salt Using a Newly Developed High-Pressure Thermal Cell, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55 (1), 91–108, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02655-0>.
- [21] Y. Liu, W. Liu and C. Wang, Study on mechanical properties and constitutive model of rock-like materials under acid corrosion, *Authorea*, 13 (March), 1–11,

2023. <https://doi.org/10.22541/au.167845653.36883128/v1>.
- [22] B. Guo, T. Cheng, J. Sun, S. Tian, Y. Chen and Y. Niu, Evolution of Peak Shear Strength of Rock Fractures Under Conditions of Repetitive Dry and Wet Cycling, *Frontiers in Earth Science*, 10 (July), 1–17, 2022. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.848440>.
- [23] T. N. Singh, P. K. Sharma and M. Khandelwal, Effect of pH on the physico-mechanical properties of marble, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66 (1), 81–87, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0047-0>.
- [24] T. P. Ngo, Q. B. Bui, V. T. A. Phan and H. B. Tran, Durability of geopolymer stabilised compacted earth exposed to wetting–drying cycles at different conditions of pH and salt, 329, 127168, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127168>.
- [25] W. Liu, P. Liu, H. Xu, B. Gong and F. Ji, Study on the Microstructure Evolution and Strength Damage Mechanism of Dolomite under Dissolution Condition, 14, 1-14, 11447, 2022. <https://doi.org/10.3390/su141811447>
- [26] ISRM The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Kozan Ofset, Ankara, 2007.
- [27] E. Tuncay and N. Hasancebi, The effect of length to diameter ratio of test specimens on the uniaxial compressive strength of rock, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (4), 491–497, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0227-9>.
- [28] M. Özdemir, Anizotropik Davranış Gösteren Metamorfik Kaya Kütlelerinde Şev Stabilitesi Analizleri. Doktor Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü, Kütahya, 2021.
- [29] M. Özdemir, S. Beyhan and K. Eraslan, The Effect of Anisotropy On The Dynamic Properties Of Schist Rocks, *Journal of Scientific Reports-A*, 49 (June 2022), 92–104, E-ISSN: 2687-6167, 2022.
- [30] H. Yıldız, K. Günay, Ş. Şahin, S. F. Niğdeli and M. Y. İçli, Hanönü (Kastamonu) bakır sahası (AR: 201300022) buluculuk talebine esas maden jeolojisi ve rezerv raporu. Ankara, 2014.
- [31] O. Çimen, M. C. Göncüoğlu and K. Sayıt, Geochemistry of the metavolcanic rocks from the Çangaldağ complex in the central pontides: Implications for the middle jurassic arc-back-arc system in the neotethyan intra-pontide ocean, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 25 (6), 491–512, 2016. <https://doi.org/10.3906/yer-1603-11>.
- [32] M. F. Uğuz and M. Sevin, 1:100.000 Scale Geological Maps of Turkey No:76 Kastamonu E32 Map Sheet. Ankara, 2007.
- [33] C. Saroglou, S. Qi, S. Guo and F. Wu, ARMR, a new classification system for the rating of anisotropic rock masses, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (August), 2018. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1369-4>.
- [34] C. Saroglou and N. Bar, The ARMR classification system and the modified Hoek-Brown failure criterion compared to directional shear strength models for anisotropic rock masses, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64 (1), 14–19, 2020. <https://doi.org/10.3311/PPci.14767>.





Düz bir levhaya çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dairesel hava jetlerinde ısı transferi etkilerinin incelenmesi

Investigation of effects of heat transfer in unconfined and confined impinging circular air jets on flat plate

Haluk Keleş^{1,*} , Yücel Özmen² 

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 08100, Artvin, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, düz bir yüzeye çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış türbülanslı dairesel hava jetlerinde çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çarpma levhası yüzeylerinde termal kamera ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinden, çarpma levhası orta eksenini boyunca sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. İncelenen tüm akış alanlarında, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerinin artan Reynolds sayısı ile arttığı, artan lüle-levha arası açıklık ile azaldığı görülmüştür. Akış alanlarında sınırlayıcı levhanın varlığı, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltmaktadır. Sınırlandırılmamış jet durumunda çarpma bölgesindeki Nusselt değerleri sınırlandırılmış jet durumuna kıyasla % 15'e varan oranda daha yüksek elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çarpan dairesel jet, Sınırlayıcı levha, Nusselt dağılımı

1 Giriş

Çarpan jetler, ısıtma, soğutma ve kurutma amaçlı birçok endüstriyel uygulamada, yüksek ısı transfer oranı sağlamları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında, cam ve metal levhaların tavllanması, tekstil ve kağıt ürünlerinin kurutulması, uçak kanatlarında oluşan buzlanmanın giderilmesi ile gaz türbinlerinde, bilgisayarlarda ve elektronik cihazlarda ısınmış bileşenlerin soğutulması yer almaktadır. Çarpan jet akışlarında ısı transferi özellikleri, lüle geometrisi, lüle-levha arası açıklık (H/D), Reynolds sayısı, türbülans koşulları ve akış alanının sınırlanması gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Çarpan jetler, akış alanlarının sınırlandırılma durumuna göre sınırlandırılmamış jet veya sınırlandırılmış jet olarak tanımlanmaktadır. Her iki akış alanı durumu için de literatürde çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, akış alanının lüle çıkış seviyesine yerleştirilen bir sınırlayıcı levha tarafından sınırlandığı geometriler, endüstriyel uygulamalarda daha yaygındır. Küçük lüle-levha arası

Abstract

In this study, the heat transfer effects on the impingement surfaces of unconfined and confined turbulent circular air jets impinging a flat surface are investigated experimentally. Temperature distributions along the center axis of the impingement plate were obtained from the temperature measurements performed with a thermal camera on the impingement plate surfaces. From the obtained temperature distributions, the effects of Reynolds number, nozzle-to-plate spacing, and the presence of confinement plate on the Nusselt distributions on the impingement plate were investigated. In all flow fields investigated, it was observed that the Nusselt values on the impingement plate increased with increasing Reynolds number and decreased with increasing nozzle-to-plate spacing. The presence of the confinement plate in the flow fields reduces the Nusselt values on the impingement plate. In the unconfined jet case, the Nusselt values in the impingement region were up to 15 % higher than in the confined jet case.

Keywords: Impinging circular jet, Confinement plate, Nusselt distribution

açıklıklarda, sınırlayıcı levha ilavesi akış alanında karmaşık akış yapılarının oluşmasına neden olmaktadır. Büyük lüle-levha arası açıklıklarda ise sınırlayıcı levhanın varlığı çarpma levhası boyunca oluşan duvar jetinin yayılımını geciktirmektedir [1]. Çarpan dairesel jetler konusunda literatürde hem deneysel hem de sayısal çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar çoğunlukla ısı transferi üzerinedir. Schrader [2], çarpan dairesel jetlerde çarpma bölgesinin, lüle çapının 1.2 katına kadar genişlediğini ifade etmiştir. Ho [3], bir levhaya çarpan hava jetinin çarpma bölgesinden sonra yön değiştirerek oluşturduğu duvar jetinde duvar boyunca gelişen sınır tabaka ile serbest akış arasındaki etkileşimi deneysel olarak incelemiştir. Goldstein vd. [4] ısıtılmış bir yüzeye çarpan sınırlandırılmamış dairesel hava jetinde taşınım ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Isı transfer katsayısının çarpma levhası ile hava jeti arasındaki sıcaklık farkından etkilendiğini ifade etmişlerdir. Baughn ve Shimizu [5] tarafından yapılan deneysel çalışmada, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte çarpma levhası üzerindeki

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hkeles@artvin.edu.tr (H. Keleş)

Geliş / Received: 05.06.2023 Kabul / Accepted: 26.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1310010

yerel ısı transfer katsayılarının azaldığı ortaya konulmuştur. Mohanty ve Tawfek [6], çarpan dairesel jetlerde, çarpma levhası üzerindeki ısı transfer katsayısının çarpma bölgesinde en büyük değeri aldıktan sonra levha yüzeyi boyunca radyal doğrultuda üstel olarak azaldığını ifade etmişlerdir. Huang ve El-Genk tarafından yapılan benzer çalışmada ortalama Nusselt sayısının $Re^{0.76}$ ile orantılı olduğu belirtilmiştir [7]. Lytle ve Webb [8], küçük lüle-levha açıklıklarında ($H/D < 1$), çarpma levhası üzerindeki sıcaklık dağılımlarını termal kamera ile inceledikleri çalışmalarında, durma noktası dışında da ısı transferinde ikincil artışların oluştuğunu belirtmişlerdir. Isı transfer katsayılarındaki bu ikincil artışların, durma noktasından itibaren yönelerek duvar boyunca sınır tabaka oluşturan jet akışının laminardan türbülansa geçişi ile ilgili olduğunu ifade etmişlerdir. Colucci ve Viskanta [9], sınırlanmış çarpan dairesel jet akışında $0.25 < H/D < 6$ aralığındaki lüle-levha arası açıklıklar için sıvı kristal tekniği ile çarpma levhası üzerindeki yerel ısı transferi özelliklerini incelemişlerdir. Isı transferi karakteristiklerinin sınırlanmış jet durumunda sınırlanmamış jete göre Reynolds sayısı ve lüle-levha arası açıklıktan daha fazla etkilendiğini belirtmişlerdir. Özmen ve Baydar [10], ısıtılmış bir levhaya çarpan sınırlanmamış dairesel jet akışında akış ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çarpma yüzeyi üzerinde Nusselt sayısındaki piklerle türbülans şiddetindeki piklerin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Herrero ve Buchlin [11], lüle geometrisinin çarpma levhası üzerindeki yerel ısı transferi dağılımına etkisini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, lüle içerisine eklenen farklı geometrik ilavelerin yerel ısı transferi dağılımını etkilediğini belirtmişlerdir. Chandratilleke vd. [12], ısıtılmış bir yüzey üzerine gönderilen titreşimli jet akışı ile jet eksenine dik doğrultuda gönderilen çapraz akış arasındaki ısı transferi etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çapraz akışın jetin ısı performansını etkilediğini ifade etmişlerdir. Ai vd. [13], hareketli bir lüleden çıkan çarpan jet akışında çarpma levhası üzerindeki ısı transferi etkilerini farklı ısı akıları ve jet çıkış hızları için deneysel olarak incelemişlerdir. Hareketli lüleden ısı transferini % 40 düzeyinde artırdığını ifade etmişlerdir. Gradeck vd. [14], hareketli bir yüzey üzerine çarpan dairesel jet akışında ısı transferi etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. k-ε türbülans modelini ve iyileştirilmiş duvar yaklaşımını kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada elde ettikleri sonuçların deneysel verilerle örtüştüğü belirtilmiştir. Sevindir [15], çapraz akışlı çarpan dairesel sıcak jet akışında ısı transferi karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Miranda ve Campos [16], sınırlanmamış ve sınırlanmış çarpan laminar jet akışını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Aynı Reynolds sayısında, sınırlanmış jet durumunda akış alanındaki girdap bölgelerinin daha uzun olduğunu belirtmişlerdir. Behnia vd. [17] tarafından yapılan sayısal çalışmada, sınırlanmamış ve sınırlanmış jet akışı durumları incelenmiş, sınırlanmanın genel olarak çarpma yüzeyindeki ortalama ısı transferinde azalmaya neden olduğu ifade edilmiştir. Sınırlanmanın ısı transferi üzerindeki olumlu etkisinin

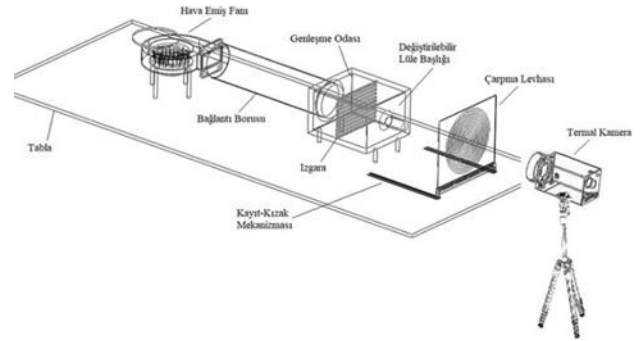
sadece çok küçük lüle-levha açıklıklarında ($H/D < 0.25$) olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, düz bir yüzeye çarpan sınırlanmamış ve sınırlanmış türbülanslı dairesel hava jetlerinde çarpma yüzeylerindeki ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, termal kamera kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada, sınırlanmamış ve sınırlanmış çarpan jet durumlarının birlikte incelenmesi ve sınırlayıcı levha etkisinin deneysel olarak belirlenmesi çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

2 Materyal ve metot

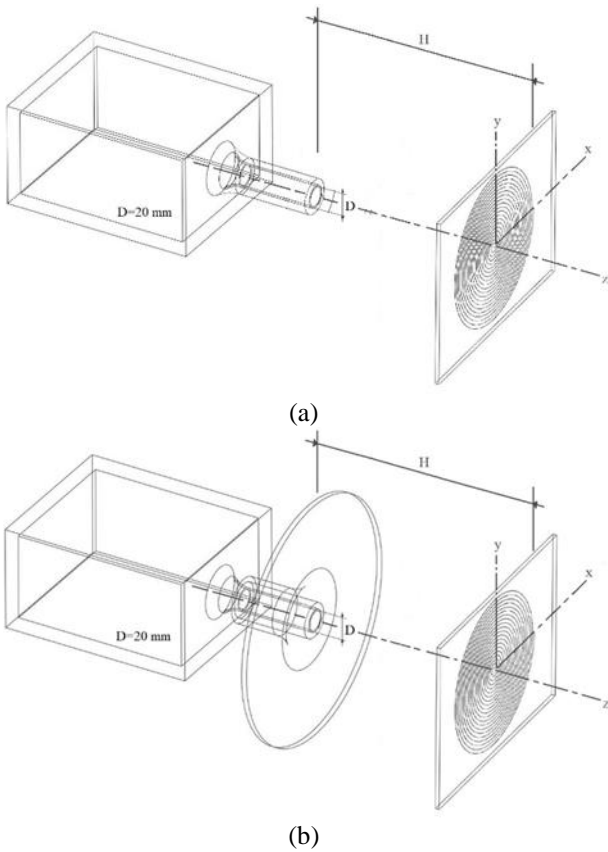
2.1 Deneysel düzenekleri

Çarpan dairesel jet akış alanlarında çarpma levhası üzerindeki ısı transferi etkilerini incelemek amacıyla yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği imal edilmiştir. Şekil 1a ve b'de sırasıyla şematik görüntüsü ve fotoğrafı verilen deney düzeneğinde, fan yardımıyla emilen ortam havası yatay şekilde konumlanmış bağlantı borusundan geçerek genişleme odasına ulaşmaktadır. Lüleden çıkan yatay hava jeti elektrikli olarak ısıtılmış dairesel çarpma levhasına çarpmaktadır. Düşey olarak konumlanmış olan ısıtılmış çarpma levhası, kayıt-kızak mekanizmasıyla yatay doğrultuda hareket ettirilerek lüle-levha arası açıklık değiştirilmektedir. Fan girişine yerleştirilmiş kapağın açıklığı değiştirilerek farklı debiler elde edilmektedir. Sıcaklık ölçümleri, epoksi levhanın arka yüzeyi üzerinde yüzeye dik doğrultuda konumlanmış termal kamera ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği (a) Şematik görünüm (b) Fotoğraf görünüm

Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneğinde, genişleme odası çıkışına yerleştirilmiş dairesel kesitli lüle ile sınırlandırılmamış jet, dairesel kesitli lüle çıkışına yerleştirilmiş sınırlayıcı levha ile ise sınırlandırılmış jet akış şartları oluşturulmuştur. Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneğinde oluşturulan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dairesel jete ait akış alanları şematik olarak sırasıyla Şekil 2a ve b'de verilmiştir. Dairesel jette lüle çapı $D=20$ mm olarak gerçekleştirilmiştir. Lüleden çıkan hava jeti, sınırlayıcı levhanın ucundan itibaren H mesafesi kadar uzakta olan ve lüle eksenine dik doğrultuda yerleştirilen elektriksel olarak ısıtılan düz levhaya çarpmaktadır.



Şekil 2. Çarpan dairesel jet akış düzeneğinde akış alanlarının şematik görünümü (a) Sınırlandırılmamış jet (b) Sınırlandırılmış jet

H , lüle-levha arası açıklığı ve D , dairesel kesitli lüle çapını göstermek üzere, sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dairesel jet akış alanlarında, $0.5 \leq H/D \leq 10$ lüle-levha arası açıklık ve $20000 \leq Re \leq 30000$ Reynolds sayısı aralıklarında çarpma levhası üzerinde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sınırlayıcı levha durumunun, levhalar arası açıklığın ve Reynolds sayısının Nusselt dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yatay eksenli çarpan jet düzeneğinde, 0.15 W/mK ısıl iletkenliğe ve 0.98 emisivite değerine sahip 1.5 mm kalınlığındaki epoksi malzemeden üretilmiş çarpma levhasının ısıtılacak dairesel bölümünde, üniform sıcaklık dağılımı elde etmek amacıyla baskı devre tekniği kullanılarak 1 mm genişliğe ve 40 μ m kalınlığa sahip bakır şeritler ile dairesel formda

elektriksel devre oluşturulmuştur. Çarpma levhasında bakır şeritlerin bulunduğu dairesel bölümün yarıçapı 90 mm değerindedir.

Dairesel çarpma levhasının termal kamera tarafındaki arka yüzeyi ise spreyci boya ile mat siyah renge boyanmıştır. Yatay eksenli çarpan jet düzeneğindeki çarpma levhasının dairesel bölümü üzerinde, ayarlı trafo yardımıyla uygulanan 20.3 Volt gerilim ve 2.01 Amper alternatif akımla, 1603.5 W/m²lik sabit ısı akısı oluşturulmuştur. Çarpma levhasının ısıtılmış dairesel kısmı üzerine üç adet termoeleman yerleştirilmiş ve termoelemanlardan alınan sıcaklık değerleri termal kamera ile karşılaştırılarak, kalibrasyon ve emisivite değerleri ayarlanmıştır. Çarpan dairesel jet düzeneğinde, 20 mm çapa ve 80 mm uzunluğa sahip lüle kullanılmıştır. Lüle ve üzerine takılabilen düz sınırlayıcı levha, Creality Ender 3 Pro marka üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Sınırlayıcı levha, dairesel jet lülesinin dış çevresi üzerine sıkı geçme şeklinde monte edilmiştir. Çarpan jetlerde Reynolds sayısı lüle çapına ve lüle çıkışındaki akış hızına göre belirlenmektedir. Çalışma kapsamında incelenen akış alanlarındaki Reynolds sayılarının belirlenmesi amacıyla lüle çıkışlarına yerleştirilen Pitot tüpü ile basınç farkları ölçülerek, lüle çıkışlarındaki jet hızları hesaplanmıştır. Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri için, Pitot tüpü ile ölçülen lüle çıkış hızları sırasıyla 15.10 m/s ve 22.65 m/s olarak gerçekleştirilmiştir. Isıtılmış durumdaki çarpma levhasına ortam havası sıcaklığındaki jetin çarptırılmasıyla, çarpma levhasından olan ısı transferi etkisi, ısıtılmış çarpma yüzeyinin arka yüzeyi tarafında yüzeye dik doğrultuda konumlanmış termal kamera ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümleriyle incelenmiştir. Yüzey sıcaklık ölçümleri, -40°C 'den $+500^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ölçüm aralığına ve 0.08°C hassasiyetine sahip, 240×320 piksel çözünürlüklü, 50 Hz ölçüm hızına sahip FLIR Thermovision A20 model termal kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri, ThermoCAM Researcher Professional paket programı ile kaydedilmiştir. Termal kamera, çarpma levhasının jet tarafındaki yüzeyi üzerine yerleştirilen termoeleman ile kalibre edilmiştir. Termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin doğrulanması amacıyla, çarpma levhasının her iki yüzeyine toplam üç adet T tipi termoeleman yerleştirilmiştir. Çarpma yüzeyi üzerine yerleştirilen termoeleman ile ölçülen sıcaklık, aynı konumda termal kamera ile ölçülen sıcaklık değeri ile karşılaştırılmış ve çarpma yüzeyindeki 0.98 emisivite değerinde termoeleman ve termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki farkın ± 1.5 K düzeyinde olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerleri, çarpma levhasındaki yerel sıcaklıkların zamanlara değişmemesi ve akışın kısa sürede sürekli rejime ulaşması nedeniyle 5 dakika süreyle kaydedilmiştir. Çarpan jetlerle ısı transferine yönelik deneysel çalışmalarda, göz önünde bulundurulması gereken faktörlerden biri de sürüklenme etkisidir. Ortam sıcaklığı ile jet akışkanının sıcaklığı arasındaki farkın yüksek olması durumunda ortaya çıkan sürüklenme etkisi, Nusselt sayısı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Çarpma levhasındaki ısı transferi analizinde sürüklenme etkisinin ihmal edilebilmesi için sıcaklık farkının 3 K'den az olması gerekmektedir [18]. Bu çalışmada, sürüklenme etkisinin düzeyini belirlemek amacıyla, lüle

çıkışına yerleştirilen bir adet termoeleman ile jet akışkanının sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda, ortam sıcaklığı ve jet akışkanının sıcaklığı arasındaki farkın 3 K'in altında olması nedeniyle, çarpma levhasındaki sıcaklık ölçümlerinde sürüklenme etkisi ihmal edilmiştir.

2.2 Isı transferi parametreleri ve hesaplama prosedürü

Çalışma kapsamında, lüle çıkışındaki hava jeti hızı U_0 ve lüle çapına göre tanımlanmış Reynolds sayısı sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır.

$$U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (1)$$

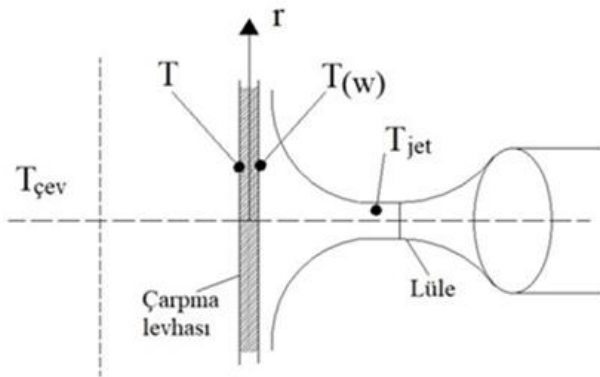
$$Re = \frac{\rho U_0 D}{\mu} \quad (2)$$

Bu bağıntılarda, ΔP , basınç farkını, ρ , akışkanın yoğunluğunu, μ , dinamik viskoziteyi ve D ise lüle çapını göstermektedir. Çarpan jet akışlarında, çarpma levhaları üzerindeki ısı transferi etkileri, aşağıda sırasıyla bağıntıları verilen ısı taşınım katsayısı (h) ve boyutsuz Nusselt sayısı (Nu) ile incelenmektedir.

$$h = q_{\text{taşınım}}/A_w(T_w - T_j) \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

Burada $q_{\text{taşınım}}$, taşınım ile ısı akısını, A_w , ısıtılmış levhanın yüzey alanını, T_w , jet tarafındaki levha sıcaklığını ve T_j , jetin çıkış sıcaklığını ifade etmektedir. Nusselt sayısı ifadesinde yer alan k , havanın ısı iletim katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3'te, düz bir yüzeye çarpan jet akışında, çarpma levhasından ısı transferinde etkili büyüklükler şematik bir görüntü ile verilmektedir. Burada, T , termal kamera ile ölçülen sıcaklığı, $T_{\text{çev}}$, çevre ortamın sıcaklığını ve $T_{(w)}$, jet tarafındaki levha sıcaklığını göstermektedir. Deneyler sırasında çevre ortamın sıcaklığı 22°C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Çarpan jetlerde ısı transferinde etkili büyüklükler

$q_{\text{taşınım}}$, taşınım ile ısı akısı, Joule etkisi ile elde edilen ısı akısından (q_{toplam}), ısı kayıpları çıkarılarak hesaplanmaktadır. Çarpma yüzeyindeki enerji dengesinden,

$$q_{\text{taşınım}} = q_{\text{toplam}} - q_{\text{iletim}} - q_{\text{doğaltaşınım}} \quad (5)$$

elde edilmektedir. Burada, q_{toplam} , toplam ısı akısı miktarını, q_{iletim} , $q_{\text{ışınım}}$ ve $q_{\text{doğaltaşınım}}$ ise sırasıyla çarpma yüzeyinden iletimle, ışınlama ve doğal taşınım ile olan ısı kaybını göstermektedir. Epoksi levhaya toplam güç girişi, ayarlı trafo tarafından sağlanan gerilim ve multimetre ile ölçülen levha direnci değerleri kullanılarak hesaplanmakta ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir.

$$Q_{\text{toplam}} = IV = V^2/R \quad (6)$$

Isı kayıpları, levhanın jete maruz kalmayan arka yüzeyi üzerindeki ışınlama, iletim ve doğal taşınım etkilerinden kaynaklanmaktadır. Çarpma levhası üzerinde aksel yönde iletimle olan ısı transferi, çarpma levhası malzemesinin düşük ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Çarpma levhası ile çevre ortamın sıcaklık değerleri arasındaki fark nedeniyle oluşan ışınlama ısı transferi aşağıda verilen Stefan-Boltzmann [19] bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$q_{\text{ışınım}} = \varepsilon A_s \sigma (T_w^4 - T_{\text{çev}}^4) \quad (7)$$

Burada, ε , çarpma levhasının emisivite değerini göstermektedir. Stefan-Boltzmann sabiti $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)] değerindedir. Çarpan dairesel jet akış düzeneğinde, düşey konumlandırılan çarpma levhasından doğal taşınım ile olan ısı kaybı, Churchill ve Chu [20] tarafından aşağıda önerilen ampirik bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra \leq 10^9 \quad (8)$$

Bu bağıntılarda, Ra ve Pr , sırasıyla Rayleigh sayısı ve Prandtl sayısı ifade etmektedir. Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak, yatay çarpan jet düzeneğinde, doğal taşınım ve ışınlama kayıpları sırasıyla toplam ısı miktarının %3'ü ve %4'ü olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıplar, yatay çarpan jet düzeneğinde toplam ısı akısının %7'si değerinde olmaktadır.

2.3 Belirsizlik analizi

Deneyler sırasında yapılan ölçümlerle ilgili Kline ve McClintock [21] tarafından önerilen eşitlik ve hesaplama yöntemi kullanılarak belirsizlik analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen Reynolds sayısına ve Nusselt sayısına ait belirsizlikler sırasıyla, \pm %2.61 ve \pm % 2.87 mertebesindedir.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, çarpan dairesel jet akış alanlarında çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen iki farklı akış alanındaki etkili parametreler için çarpma levhaları üzerinde termal kamera ile sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Sıcaklık dağılımları, çarpma levhası orta eksen boyunca elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası

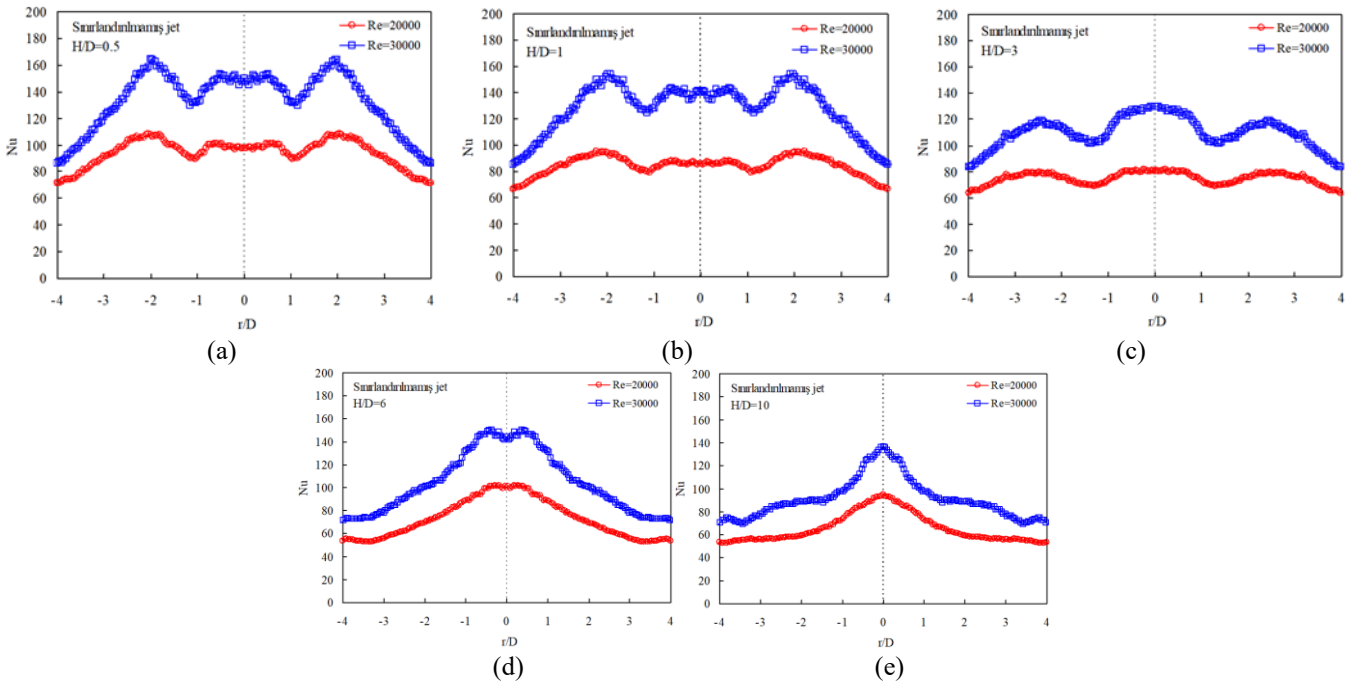
üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi incelenmiştir. Çarpma dairesel jet akışında ısı transferi deneyleri, sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış akış alanlarında Reynolds sayısının $Re = 20000$ ve 30000 değerleri ve sınırlayıcı levha-çarpma levhası arası açıklığın $H/D = 0.5, 1, 3, 6$ ve 10 değerleri için gerçekleştirilmiştir. Çarpma levhası üzerindeki sıcaklık değerleri, ısıtılmış çarpma yüzeyinin arka yüzeyi üzerinde yüzeye dik doğrultuda yerleştirilmiş termal kamera kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinden, çarpma levhası üzerindeki boyutsuz Nusselt dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış çarpma jet akış alanları için incelenmiştir.

3.1 Sınırlandırılmamış dairesel jet

Sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında, iki farklı Reynolds sayısında çarpma levhasının üzerinde yatay orta eksen boyunca ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları lüle-levha açıklığının $0.5, 1, 3, 6$ ve 10 değerleri için sırasıyla Şekil 4a-e’de verilmiştir. $H/D=0.5$ açıklığında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri için çarpma levhasının üzerinde yatay orta eksen boyunca ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları Şekil 4a’da verilmiştir. Reynolds sayısının 30000 değerinde çarpma levhası yatay orta eksen boyunca elde edilen Nusselt değerleri Reynolds sayısının 20000 değeri için hesaplanan Nusselt değerlerinden daha büyük olmaktadır. Her iki Reynolds sayısı değerinde de yerel Nusselt sayıları çarpma levhası üzerindeki $r/D \approx \pm 2$ konumunda durma bölgesindeki değerlerinden daha büyük değerler olarak ikincil pikler oluşturmaktadır. İkincil piklerden sonra Nusselt değerleri levha uçlarına doğru yeniden azalmaktadır. Durma noktasındaki ve ikincil piklerin olduğu konumdaki Nusselt değerleri arasındaki fark

Reynolds sayısının 30000 değerinde daha büyük olmaktadır. Lüle-levha arası açıklığın $H/D=1$ değerinde iki farklı Reynolds sayısı için Şekil 4b’de verilen Nusselt dağılımlarında da, Şekil 4a’da $H/D=0.5$ açıklık için verilen dağılımlara benzer şekilde çarpma levhası üzerindeki $r/D \approx \pm 2.5$ konumunda durma noktasına göre daha güçlü olan ikincil pikler oluşmaktadır. $H/D=3$ açıklığında, çarpma levhası üzerinde yatay orta eksen boyunca iki farklı Reynolds sayısı için elde edilen Nusselt dağılımları Şekil 4c’te görülmektedir. $Re=30000$ ’de çarpma levhası üzerindeki yerel Nusselt değerleri daha büyük olmaktadır. Çarpma levhası üzerinde $r/D \approx \pm 3.5$ konumunda durma noktasına göre daha zayıf olan ikincil pikler oluşmaktadır. $H/D=6$ açıklığında, Reynolds sayısının iki farklı değeri için Şekil 4d’de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhası üzerinde herhangi bir ikincil artışın oluşmadığı görülmektedir. Şekil 4e’de lüle-levha arası açıklığın $H/D=10$ değeri için verilen Nusselt dağılımları Şekil 4d’de $H/D=6$ için verilen dağılımlara benzer şekilde durma noktasındaki en yüksek değerden levha uçlarına doğru dramatik olarak azalan bir görüntü oluşturmaktadır.

Sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 ve lüle-levha arası açıklığın $0.5, 1, 3, 6$ ve 10 değerlerinde çarpma levhası yüzeyinde ölçülen sıcaklık değerlerinden elde edilen dağılımlar birlikte değerlendirildiğinde, her iki Reynolds sayısında da artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. Düşük lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \leq 1$), çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil pikler durma noktasında oluşan piklere göre daha büyük olmaktadır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte etkisi azalan ikincil pikler, yüksek lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \geq 6$) kaybolmaktadır.



Şekil 4. Sınırlandırılmamış jet akışında farklı açıklıklar için Reynolds sayısı etkisi

3.2 Sınırlandırılmış dairesel jet

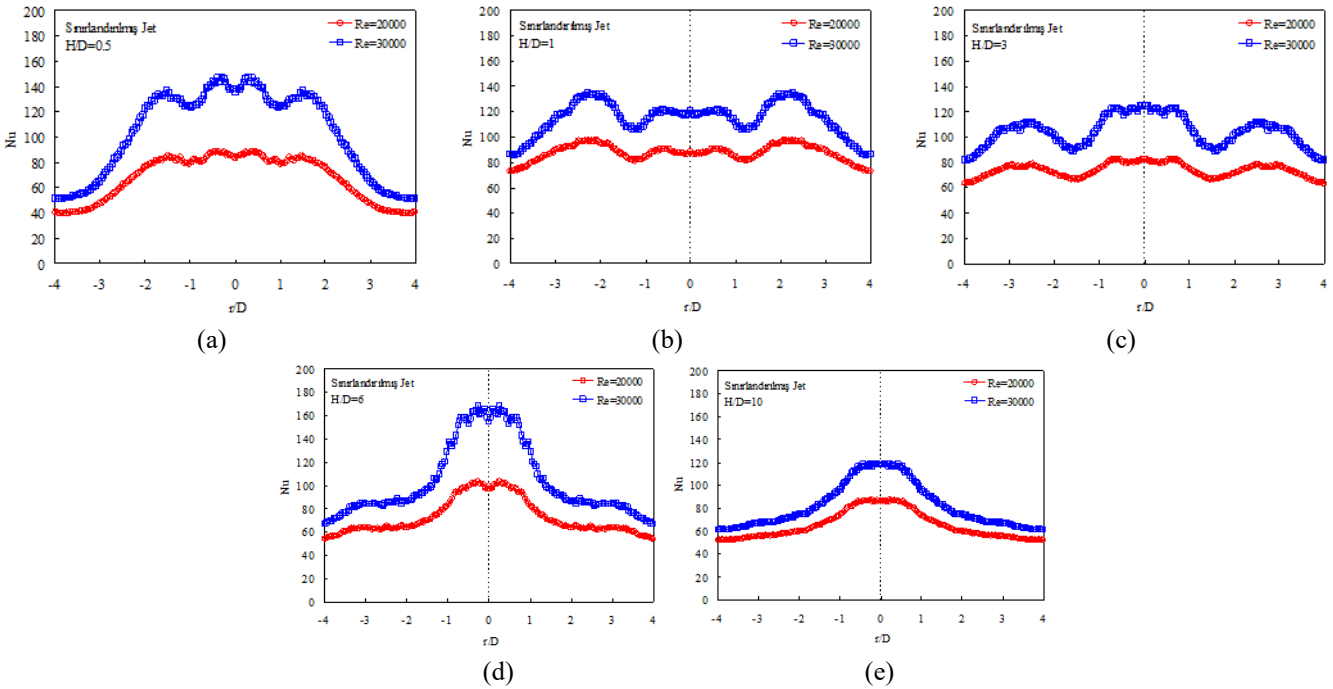
Düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dairesel jet için, iki farklı Reynolds sayısında çarpma levhasının yatay orta eksenini boyunca elde edilmiş Nusselt dağılımları levhalar arası açıklığın 0.5, 1, 3, 6 ve 10 değerleri için sırasıyla Şekil 5a-e’de verilmiştir. Levhalar arası açıklığın $H/D=0.5$ değeri için, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde çarpma levhası üzerinde yatay orta eksen boyunca ölçülen sıcaklık değerlerinden elde edilmiş Nusselt dağılımlarının verildiği Şekil 5a’da, artan Reynolds sayısı ile birlikte çarpma levhası boyunca Nusselt değerlerinin arttığı görülmektedir. Her iki Reynolds sayısı değerinde de, çarpma levhası üzerinde lüle eksenini doğrultusundaki durma noktasının yakınında ($r/D \approx \pm 0.5$) yerel Nusselt sayısı maksimum değer almaktadır. Durma noktasından itibaren $r/D \approx \pm 1.5$ konumunda Nusselt dağılımlarında ikincil pikler oluşmaktadır. Durma noktası yakınındakilere göre daha zayıf olan ikincil pikler, Reynolds sayısı arttıkça belirginleşmektedir. $H/D=1$ levhalar arası açıklık için Şekil 5b’de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhası üzerinde $r/D \approx \pm 2.5$ konumunda oluşan ikincil piklerin durma noktası civarındaki piklere göre daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 5c’de, levhalar arası açıklığın $H/D=3$ değeri için iki farklı Reynolds sayısında çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımları görülmektedir. Çarpma levhası üzerinde $r/D \approx \pm 3$ konumunda oluşan ikincil pikler durma bölgesinde oluşan piklere göre daha zayıf olmaktadır. $H/D=6$ açıklığında, Reynolds sayısının iki farklı değeri için Şekil 5d’de verilen Nusselt dağılımlarından, çarpma levhası üzerinde herhangi bir ikincil pikin oluşmadığı görülmektedir. Şekil 5e’de levhalar arası açıklığın $H/D=10$ değeri için verilen Nusselt dağılımları Şekil 5d’de $H/D=6$

için verilen dağılımlara benzer şekilde çarpma bölgesindeki en yüksek değerden levha uçlarına doğru olarak azalan bir görüntü oluşturmaktadır.

Düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dairesel jet akışında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 ve levhalar-arası açıklığın 0.5, 1, 3, 6 ve 10 değerlerinde çarpma levhası yüzeyinde ölçülen sıcaklık değerlerinden elde edilen dağılımlar birlikte değerlendirildiğinde, her iki Reynolds sayısında da artan levhalar arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. $H/D \leq 3$ levhalar arası açıklıklarda oluşan ikincil piklerin konumu, açıklık arttıkça durma noktasından uzaklaşmaktadır. Yüksek levhalar arası açıklıklarda ikincil pikler ($H/D \geq 6$) kaybolmaktadır. $H/D=6$ açıklığında, Nusselt sayısı en yüksek değerini almaktadır. Bu durum, durma noktası yakınındaki türbülans seviyesinin $H/D=6$ açıklığında en büyük olması nedeniyledir.

3.3 Sınırlayıcı levha etkisi

Reynolds sayısının 30000 değeri için çarpma levhası yatay orta eksenini boyunca elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde sınırlayıcı levha durumunun etkisi, lüle-levha açıklığının $H/D=0.5, 1, 3, 6$ ve 10 değerleri için sırasıyla Şekil 6a-e’de verilmiştir. Lüle-levha arası açıklığın $H/D=0.5$ değerinde, sınırlandırılmamış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri, sınırlandırılmış jet durumundaki değerlerden daha büyük olmaktadır. Sınırlayıcı levhanın varlığı hem çarpma bölgesindeki piklerin hem de çarpma bölgesi uzağındaki ikincil piklerin etkisini azaltmaktadır. Sınırlayıcı levhanın olmadığı jet durumunda $r/D \approx \pm 2$ konumunda oluşan ikincil pikler, sınırlayıcı levhanın olduğu jet durumunda $r/D \approx \pm 1.5$ konumunda oluşmaktadır (Şekil 6a).



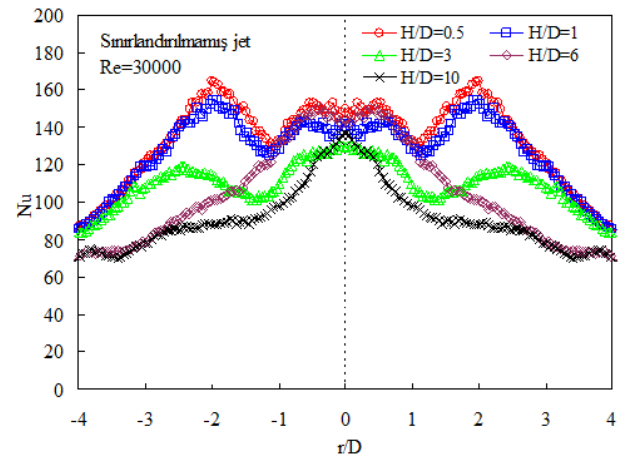
Şekil 5. Sınırlandırılmış jet akışında farklı açıklıklar için Reynolds sayısı etkisi

$H/D=1$ açıklıkta, $H/D=0.5$ 'teki duruma benzer şekilde çarpma levhası üzerinde çarpma bölgesini de içine alacak şekilde ikincil piklerin olduğu konuma kadar ki bölgede Nusselt değerleri sınırlanmamış jet durumunda daha büyük olmaktadır. Levha uçlarına doğru uzanan bölgelerde ise sınırlayıcı levhanın etkisi kaybolmaktadır (Şekil 6b). Lüle-levha arası açıklığın $H/D=3$, $H/D=6$ ve $H/D=10$ değerlerinde, sınırlanmamış jet ve sınırlanmış jet durumlarına için çarpma levhası üzerinde elde edilmiş Nusselt dağılımları arasında belirgin bir fark oluşmamaktadır (Şekil 6c-e). Sınırlayıcı levhanın varlığı, küçük lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \leq 1$), çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltıcı bir etki gösterirken, büyük lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \geq 3$), bu etki ortadan kalkmaktadır. Behnia ve diğ. [17], çarpan dairesel jet akışında, sınırlanmamış küçük lüle-levha arası açıklıklarda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azalttığını, artan lüle-levha arası açıklıkla bu etkinin kaybolduğunu belirtmişlerdir. Colucci ve Viskanta [9], sınırlanmamış jet durumundaki ısı transfer performansının sınırlanmış jete göre %20-30 oranında daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

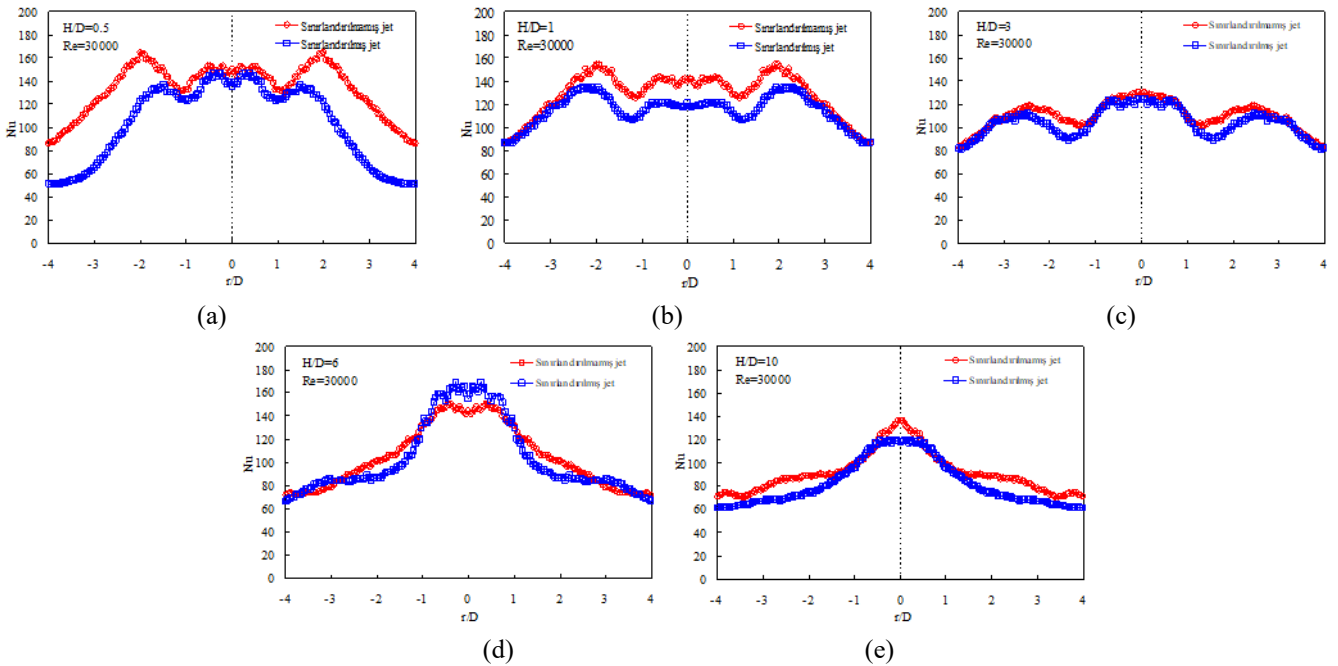
3.4 Levhalar arası açıklık etkisi

Reynolds sayısının 30000 değeri için çarpma levhası yatay orta eksenini boyunca $H/D=0.5$, 1, 3, 6 ve 10 açıklıklarında elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde levhalar arası açıklık etkisi, sınırlanmamış ve sınırlanmış jet durumları için sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Sınırlanmamış jet durumunda, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt değerleri azalmaktadır. Küçük lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \leq 1$), çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil pikler çarpma

bölgesinde oluşan piklere göre daha büyük olmaktadır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte daha büyük $\pm r/D$ konumlarına kayan ve etkisi azalan ikincil pikler, büyük lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \geq 6$) kaybolmaktadır (Şekil 7). Baughn ve Shimizu [5], sınırlanmamış çarpan dairesel jet akışında, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte çarpma levhası üzerindeki yerel ısı transfer katsayıları azaldığını belirtmişlerdir. Lytle ve Webb [8], sınırlanmamış çarpan dairesel jet akışında, küçük lüle-levha açıklıklarında ($H/D < 1$), durma noktası dışında ısı transferinde ikincil artışların olduğunu ve bu artışların, durma noktasından itibaren yönlendirilerek duvar boyunca sınır tabaka oluşturan jet akışının laminardan türbülansa geçişi ile ilgili olduğunu ifade etmişlerdir.

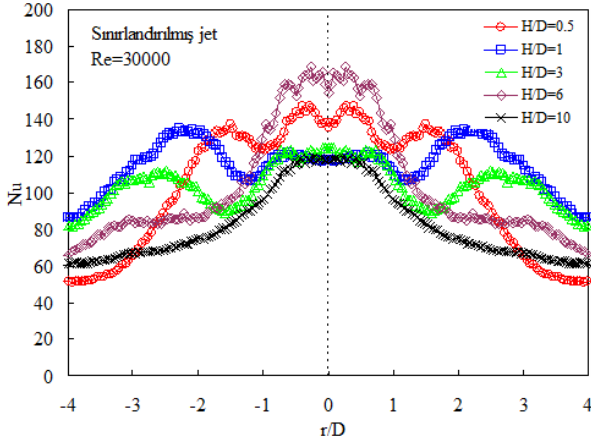


Şekil 7. $Re=30000$ için sınırlanmamış jet durumunda çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 6. Sınırlayıcı levha etkisi

Düz sınırlayıcı levha ile sınırlandırılmış jet durumunda, sınırlandırılmamış jet durumuna benzer şekilde, artan levhalar arası açıklıkla birlikte yerel Nusselt sayısı değerleri azalmaktadır. $H/D \leq 3$ levhalar arası açıklıklarda oluşan ikincil piklerin konumu, açıklık arttıkça durma noktasından uzaklaşmaktadır. Yüksek levhalar arası açıklıklarda ikincil pikler ($H/D \geq 6$) kaybolmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. $Re=30000$ için sınırlandırılmış jet durumunda çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Hem sınırlandırılmamış hem de sınırlandırılmış çarpma dairesel jetlerde, küçük lüle-levha/levhalar arası açıklıklarında/açıklıklarda ($H/D \leq 3$), duvar jeti bölgesinde

akışın laminardan türbülansa geçmesi ve duvar yakınında türbülans seviyesinin artması nedeniyle Nusselt sayılarında ikincil pikler ortaya çıkmaktadır. Yüksek lüle-levha/levhalar arası açıklıklarında/açıklıklarda ($H/D \geq 6$) ise jet akışının gelişimini tamamlaması ve momentumunun azalması nedeniyle ikincil pikler kaybolmaktadır.

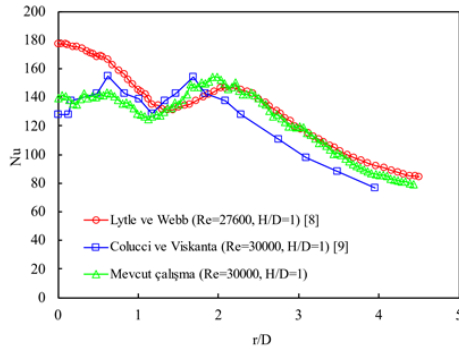
3.5 Literatür ile karşılaştırma

Mevcut çalışmada, sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında, çarpma levhası yüzeyinde farklı Reynolds sayılarında ve lüle-levha arası açıklıklarda termal kamera ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinden elde edilen Nusselt dağılımlarının, literatürde bulunan benzer deneysel dağılımlarla [7, 8, 9, 10, 22, 23] karşılaştırması lüle-levha arası açıklığın $H/D=1, 3, 6$ ve 10 değerleri için sırasıyla Şekil 9a-d'de verilmiştir. Dört lüle-levha arası açıklık durumunda da, mevcut çalışmaya ait sonuçların, literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür

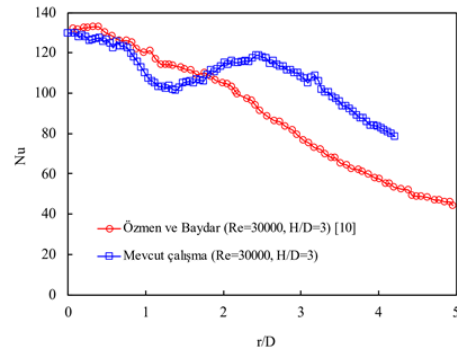
4 Sonuçlar

Bu çalışmada, çarpma dairesel jet akış alanlarında çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımları, çarpma levhası orta eksenini boyunca elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır.

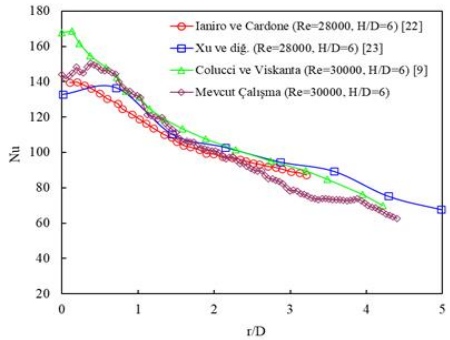
Çalışmadan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:



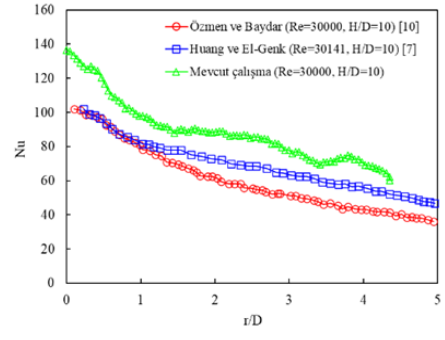
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 9. Sınırlandırılmamış çarpma dairesel jet akışında, $H/D=1, 3, 6$ ve 10 için Nusselt dağılımlarının literatürdeki benzer çalışmaları ile karşılaştırması

1. Sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet akışında, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile ve azalan lüle-levha arası açıklıkla artmaktadır. Küçük lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \leq 1$), çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil pikler durma noktasında oluşan piklere göre daha büyük olmaktadır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte etkisi azalan ikincil pikler, büyük lüle-levha arası açıklıklarda ($H/D \geq 6$) kaybolmaktadır.

2. Sınırlandırılmamış dairesel çarpan jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri, sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet durumundaki değerlerden daha büyük olmaktadır. Sınırlayıcı levha, küçük levhalar arası açıklıklarda ($H/D \leq 1$), çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltıcı bir etki göstermekte, büyük levhalar arası açıklıklarda ($H/D \geq 3$) ise, bu etki ortadan kalkmaktadır.

3. Sınırlandırılmamış çarpan dairesel jet akışında, çarpma levhası üzerinde oluşan ikincil piklerin konumu, sınırlandırılmamış jet durumuna göre çarpma levhası uçlarına doğru kaymaktadır.

4. Çarpan dairesel jet akışında, çalışma kapsamında çarpma levhası üzerinde termal kamera ile ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları, literatürde mevcut deneysel dağılımlarla oldukça uyumludur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 16

Kaynaklar

- [1] C. J. Danek, Heat transfer under impinging jets at very close jet-to-target spacings. PhD Thesis, Stanford University, Ann Arbor, USA, 1995.
- [2] H. Schrader, Trocknung feuchter oberflächen mittels warmluftstrahlen. VDI Forschungsheft Ausgabe, 484, B 27, 1961.
- [3] C. M. Ho, Local and global dynamics of free shear layers. Numerical and Physical Aspects of Aerodynamic Flows, 521-533, 1982. https://doi.org/10.1007/978-3-662-12610-3_30.
- [4] R. J. Goldstein, K.A. Sobolik, and W.S. Seol, Effect of entrainment on the heat transfer to a heated circular air jet impinging on a flat surface. Journal of Heat Transfer, 112(3), 608-611, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2910430>.
- [5] J. W. Baughn and S. Shimizu, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, Journal of Heat Transfer, 111(4), 1096-1098, 1989. <https://doi.org/10.1115/1.3250776>.
- [6] A. K. Mohanty and A.A. Tawfek, Heat transfer due to a round jet impinging normal to a flat surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 36(6), 1639-1647, 1993. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(05\)80073-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(05)80073-0).
- [7] L. Huang and M.S. El-Genk, Heat transfer of an impinging jet on a flat surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 37(13), 1915-1923, 1994. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90331-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90331-X).
- [8] D. Lytle and B.W. Webb, Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings. International Journal of Heat and Mass Transfer, 37(12), 1687-1697, 1994. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90059-0).
- [9] D. W. Colucci and R. Viskanta, Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. Experimental Thermal and Fluid Science, 13(1), 71-80, 1996. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(96\)00015-5](https://doi.org/10.1016/0894-1777(96)00015-5).
- [10] Y. Ozmen and E. Baydar, Flow structure and heat transfer characteristics of an unconfined impinging air jet at high jet Reynolds numbers. Heat and Mass Transfer, 44(11), 1315-1322, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00231-008-0378-4>.
- [11] R. Herrero and J.M. Buchlin, Effect of nozzle shape on local heat transfer distribution in impinging jets. 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Quebec, Canada, 27-30 July 2010. <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2010.054>
- [12] T. T. Chandratilleke, R. Narayanaswamy and D. Jagannatha, Thermal performance evaluation of a synthetic jet heat sink for electronic cooling. IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, pp. 79-83, 2011. <https://10.1109/EPTC.2011.6184390>.
- [13] X. Ai, Z.G. Xu and C.Y. Zhao, Experimental study on heat transfer of jet impingement with a moving nozzle. Applied Thermal Engineering, c. 115, pp. 682-691, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.004>.
- [14] M. Gradeck, A. Kouachi, A. Dani, D. Arnoult and J.L. Boréan, Experimental and numerical study of the hydraulic jump of an impinging jet on a moving surface. Experimental Thermal and Fluid Science, c. 30, 193-201, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.05.006>.
- [15] M. K. Sevindir, Çarpma Akış İçerisinde Sıcak Jet Akışının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [16] J. M. Miranda and J.B.L.M. Campos, Impinging jets confined by a conical wall: Laminar flow predictions. AIChE Journal of Fluid Mechanics and Transport Phenomena, c. 45, 2273-2285, 1999. <https://doi.org/10.1002/aic.690451103>.
- [17] M. Behnia, S. Parneix, Y. Shabany and P.A. Durbin, Numerical study of turbulent heat transfer in confined and unconfined impinging jets. International Journal of Heat and Fluid Flow, c. 20, 1-9, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(98\)10040-1](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(98)10040-1).
- [18] L. Huang, Heat transfer and flow visualization of conventional and swirling impinging jets. PhD Thesis, New Mexico University, Albuquerque, New Mexico, 1996.
- [19] T. L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera and D.P. Dewitt, Introduction to Heat Transfer. Wiley, Sixth Edition. New Jersey, ABD, 2011.

- [20] S. W. Churchill and H.H.S. Chu, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329, 1975. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90243-4).
- [21] S. Kline and F. McClintock, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, 75, 3-8, 1953.
- [22] A. Ianiro and G. Cardone, Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets. *Applied Thermal Engineering*, 49, 89-98, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.018>.
- [23] L. Xu, T. Yang, Y. Sun, L. Xi, J. Gao, Y. Li and J. Li, Flow and heat transfer characteristics of a swirling impinging jet issuing from a threaded nozzle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100970>.





Utilization of toxic marine invaders in the development of low-loss microwave devices

Düşük kayıplı mikrodalga cihazlarının geliştirilmesinde zehirli deniz istilacılarının kullanımı

Erkan Uğurlu¹ , Önder Duysak² , Fatih Özkan Alkurt³ , Muharrem Karaaslan^{4,*} ,

Arlet Patricia Franco⁵ 

^{1,2} Faculty of Marine Science and Technology, Iskenderun Technical University, 31200, Iskenderun, Hatay, Türkiye

^{3,4} Faculty of Natural Science and Engineering, Iskenderun Technical University, Iskenderun, Hatay, Türkiye

⁵ Grupo de Investigación Ingeniar, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Corporación Universitaria Remington, Calle 51 No. 51-27, Medellín, Colombia

Abstract

This research paper presents constitutive parameters of toxic marine invaders (*Diadema setosum*) and offers the availability of materials from these invaders for microwave applications. Two different powder form of these invaders were prepared and calcined at different temperatures. These biomaterials have been obtained for grinding shell and spines of sea urchin were turned into powder. The constitutive parameters as complex dielectric constants of these classified biomaterials have been investigated in 3.2-20 GHz frequency range with open-ended coaxial probe method. Measured results show that these biomaterials have a potential usage area in microwave range are mentioned firstly in literature. Measured complex permittivity properties of samples of shell and spines of invasive long-spined sea urchin have demonstrated that samples can be utilized in development of high-quality microwave radomes with high impedance matching to air and low loss microwave substrates.

Keywords: *Diadema setosum*, Microwave electronics, Microwave substrates, Radome

1 Introduction

The lack of prey pressure on marine animals with no economic value and their rapid spread have negative effects on the ecosystem and native (endemic) species in the marine environment in which they live [1,2]. Especially in the last decade, the Mediterranean Sea is a good example of this invasive species due to the rapid increase. Entry of invasive species to the Mediterranean Sea is mainly by ship transportation through the Suez Canal and the Strait of Gibraltar. Species entering via the Suez Canal are called Lessepsian species, and 80 fish and 123 invertebrates have been entered so far [3]. Among the invasive fish species, especially puffer fish are harmful invaders that have spread throughout the Mediterranean within 20 years [4]. Similarly,

Öz

Bu araştırma makalesi, mikrodalga uygulamaları için zehirli deniz istilacılarının (*Diadema setosum*) mikrodalga parametrelerini incelemektedir ve bu istilacılardan elde edilen malzemelerin mikrodalga uygulamaları için kullanılabilirliğini sunmaktadır. Bu istilacı canlılardan iki farklı toz formu hazırlanmış ve farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiştir. Bu biyomalzemeler denizkestanesi *D. setosum*'un kabuk ve dikenlerinin öğütülmesi ile elde edilmiş ve toz haline getirilmiştir. Bu sınıflandırılmış biyomalzemelerin dielektrik sabiti olan yapısal parametreleri, açık uçlu koaksiyel prob yöntemi ile 3,2-20GHz frekans aralığında incelenmiştir. Ölçüm sonuçları ile desteklenen bu çalışma, mikrodalga frekans aralığında potansiyel bir kullanım alanına sahip olan bu biyomateryallerin literatürde ilk kez bahsedildiğini göstermektedir. İstilacı uzun dikenli denizkestanesinin kabuk ve diken örneklerinin ölçülen karmaşık geçirgenlik özellikleri, örneklerin havaya ve düşük kayıplı mikrodalga substratlara uyan yüksek empedanslı yüksek kaliteli mikrodalga radomların geliştirilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: *Diadema setosum*, Mikrodalga elektronik, Mikrodalga substrat, Radom

the lionfish (*P. miles*) spreads rapidly throughout the Mediterranean Sea [5]. One of the invertebrate species that enter the Mediterranean Sea and have a serious potential for invasion is the long-spined sea urchin *Diadema setosum* [6]. The invasive long-spined sea urchin (*D. setosum*) is a species of Indo-Pacific origin and it is widely distributed in the Red Sea (Gulf of Suez, Gulf of Aqaba, Northern and Southern Red Sea), east coast of Africa, Japan and Australia [7]. It was reported for the first time on the Turkish coasts in 2006 on the Kas Peninsula of Antalya, and then on the coasts of the Iskenderun Bay, Aegean Sea and Marmara Sea [8-10]. *D. setosum* (Figure 1) reaches large sizes due to its unique feeding habits and reproductive behaviors and poses a great threat to endemic species with the increase in its population.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muharrem.karaaslan@iste.edu.tr (M. Karaaslan)

Geliş / Received: 06.06.2023 Kabul / Accepted: 11.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1310254

Due to its morphological structure (like long spines), sea urchin damages the fishing gear and fishing activities. In addition, its long, black, and toxic spines cause adverse effects such as painful injury, swelling and redness if it penetrates the human skin.



Figure 1. *Diadema setosum* (original picture).

In this study, the shell (Shell-T) and spines (Spine-S) of the invasive sea urchin were ground without any treatment. Powdered shell and spines and these two powder samples were calcined at different temperatures. In this research, biomaterials have been obtained because of grinding the shell and spines of sea urchin were turned into powder. The powder samples were classified into different samples after being subjected to calcination at different temperatures. The electrical properties of these classified biomaterials have been investigated in the microwave frequency range with the

open-ended coaxial probe method. The investigation of electromagnetic properties of biomaterials obtained from sea urchins in the microwave frequency range of 3.2-20 GHz have been carried out for the first time in the literature. According to the results of the measurements, potential usage areas in the microwave frequency region are also mentioned for the first time in the literature. The measured electrical properties of the samples obtained from shell and spines of invasive long-spined sea urchin have demonstrated that the samples can be utilized in development of high-quality microwave radomes with high impedance matching to air and low loss microwave substrates to design microwave circuits.

Hence, this invasive marine invertebrate, which can be used in related fields and is not consumed in our country, will be brought to the country's economy as a biomaterial with high economic value.

2 Material and methods

Invasive sea urchin (*Diadema setosum*) used in the production of biomaterials has been collected from the Iskenderun Bay. Sea urchins brought to the laboratory were first trimmed and separated from their spines (Figure 2a). Sea urchin shells (testa) were divided into two with a pair of scissors and all soft tissues were removed (Figures 2b and 2c). Afterwards, the shell and spines were thoroughly washed with tap water and then with bidistilled water and dried in an oven at 70 °C for 24 hours (Figures 2b and 2c). The dried biomaterials were ground and sieved with the help of a grinder (Figures 2d and 2e).



Figure 2. Trimmed and separated form of spines of sea urchins (a) shells (b) and spines (c) divided into two with a pair of scissors of sea urchin, washed with tap water and then with bidistilled water and dried in an oven at 70 °C for 24 hours of the shell (d) and spines (e)

Some of the dried shell and spine powders were calcined in a chamber type furnace (Proterm PLF series), each sample was calcined at 4 different temperatures (600, 800, 1000 and 1200 °C) for 1 hour at a heating rate of 5 °C/min. Moreover, the materials were left to dry in a desiccator at room temperature. Immediately afterwards, the shell powder biomaterial was labeled T, T600, T800, T1000, and T1200, and the spine powder biomaterials S, S600, S800, S1000, and S1200 (Figures 3a and b). It was kept in closed falcon tubes to be used in experiments to measure electromagnetic properties in microwave analysis. After these processes, microwave analysis has been started.

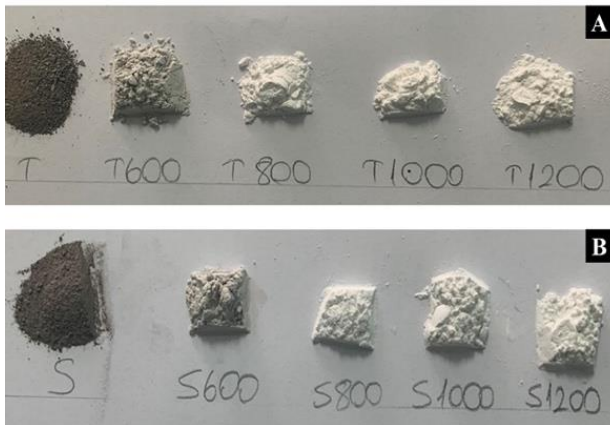


Figure 3. The prepared samples of shell (a) and spine (b) powders dried with various temperature.

2.1. Microwave analysis

Prepared shell and spine powder samples have been characterized in microwave laboratory and the complex permittivity parameters of each sample are obtained by using dielectric probe kit and an Agilent PNL A Vector Network Analyser (VNA) as shown in Figure 4a. Hence, the utilization potential in microwave applications of the samples have been investigated in a wide frequency range. Although various techniques can be used to obtain the relative permittivity of the samples such as Nicolson Ross Weir method, open ended coaxial prob method has been selected due to the samples in the form of powder.

The dielectric parameters of a material is expressed in terms of the relative permittivity as [11];

$$\epsilon = \frac{P}{\epsilon_0 E} + 1 \quad (1)$$

where P is the polarization to the electrical field strength and E of an external electric field. The relative complex dielectric constant of the sample is [12];

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2)$$

The loss tangent is as follow [12];

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

Before the measurement, a calibration process has been completed to minimize the losses, noises and interferences caused by laboratory conditions. Besides, the measurement frequency region has been chosen between 1 GHz and 20 GHz which is the maximum dielectric parameter band of the utilized VNA. In the calibration process, the dielectric probe kit has been tested under three conditions. Firstly, probe kit has been tested under open ended line that measures air in room temperature (Figure 4b). Secondly, a shorting block has been connected to the end of the probe line that creates short circuit effect on the main microwave line (Figure 4c). Finally, a clean water tube is connected to the probe line under room temperature condition and calibrated by this reference liquid (Figure 4d). Moreover, since, dielectric characteristics of the water and the air are well known, measured values of these samples have been used to test the accuracy of the calibration.

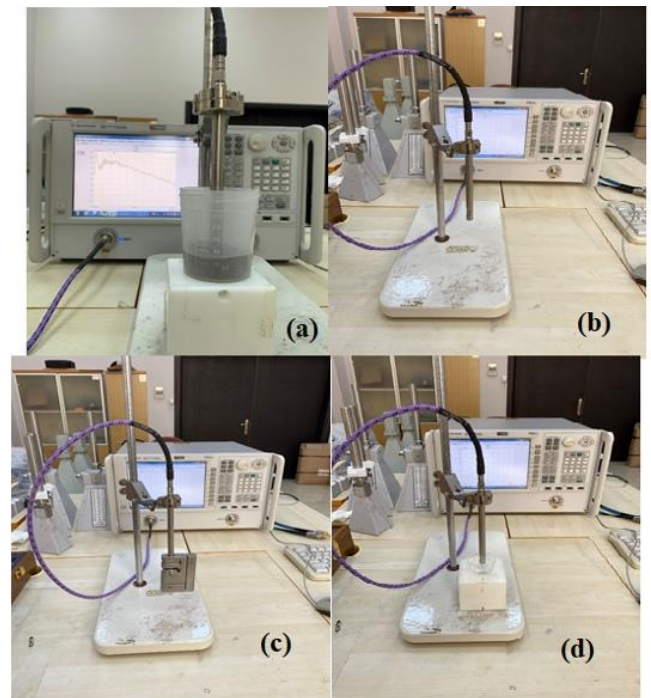


Figure 4. Complex dielectric parameter measurement setup for 1 GHz-20 GHz band (a) Calibration with respect to air (b) known load (c) pure water (d).

Furthermore, the measured real and the imaginary parts of the various shell samples are illustrated in Figure 5. The real parts permittivity of ds-shell, shell-600, shell-800, shell-1000 and shell-1200 are 3.6, 3.2, 2.2, 2.0 and 2.4 at center frequency of 10 GHz, respectively. Moreover, the imaginary parts of ds-shell, shell-600, shell-800, shell-1000 and shell-1200 are 0.9, 0.8, 0.35, 0.3 and 0.4 at center frequency 10 GHz, respectively. These differences are caused by the applied various heating temperatures. In addition, air has values of 1 for real and 0 for imaginary parts of the complex permittivity.

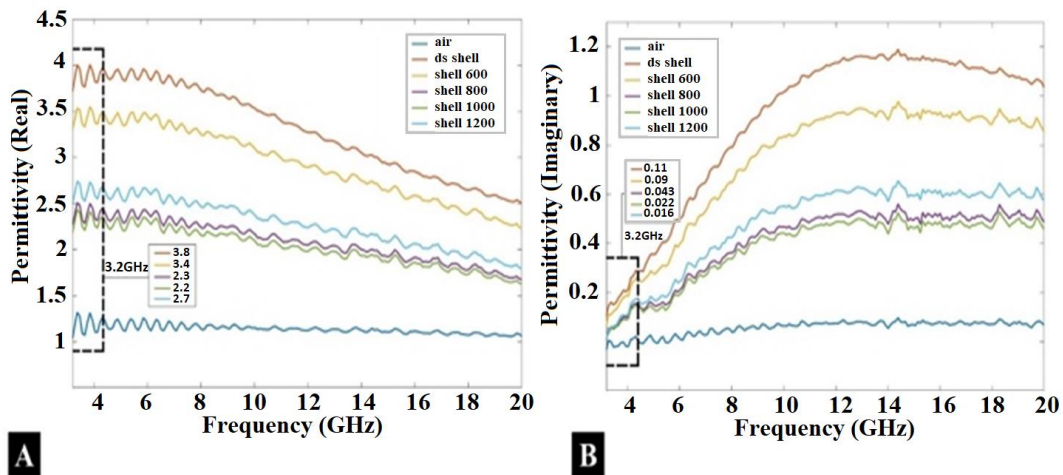


Figure 5. Real (a) and Imaginary (b) parts of measured Shell samples in frequency range of 3.2-20 GHz

According to the measurement values of the imaginary parts of relative permittivity results, especially except for ds shell sample, all the samples have very low imaginary part between 3.2-4 GHz frequency ranges. Due to these low values of losses (i.e. imaginary part of permittivity) and to form of powder, the samples under tests can be utilized as microwave laminate materials such as FR4 and some types of Rogers. The loss tangents of FR4 and Rogers 7880 are between 0.02-0.03 and 0.0009 for FR4 and Rogers 7880 laminates, respectively. It is well known that the prices of the laminates increase with respect to low losses characteristics at microwave applications especially for military technology. The proposed samples can be a good candidate for future organic laminate productions after effectively pressing the powders. In addition, the difference of real part of the permittivity for various samples can also give chance to fabricate various laminates with different dielectric constants for microwave device designers' areas. It can be seen from the figure that the real parts of the permittivities for ds-shell, shell-600, shell-800, shell-1000 and shell-1200 are 3.8, 3.4, 2.3, 2.2 and 2.7, respectively for 3.2 GHz (Table 1).

Table 1 The comparison of real and imaginary parts of samples with commercial substrates

Sample	Dielectric constant (Real) at 3.2 GHz	Dielectric constant (Imag) at 3.2 GHz
FR-4	4.3	0.1075
Roger 5880	2.2	0.00198
Ds-shell	3.8	0.11
Shell-600	3.4	0.09
Shell-800	2.3	0.043
Shell-1000	2.2	0.022
Shell-1200	2.7	0.016

One other microwave application area of the materials is radome design. In radome design, the important requirements are low losses of the structure in related

frequency range, high impedance matching with free space and mechanical strength. As can be concluded from the measurement values, the measurement results of powders guarantee the low loss criteria. Besides, the samples with real part of permittivity around 2 also can provide impedance matching with free space. Hence, if the pressing of the powder is sufficient in terms of strength, the materials can be used in radome applications as a natural candidate.

In addition, the investigation of the samples with respect to change of temperature has been realized due to observe temperature dependency of the samples. As can be observed in Figure 6a, the temperature change results in alteration especially in real part of the permittivity. Hence, it can be concluded that the minimization of temperature change must be studied by adding additives for future studies.

Similarly, the complex permittivity of various spine materials has been measured as given in Figure 6b. The ds-spine, spine-600, spine-800, spine-1000 and spine-1200 has 4.9, 3.2, 2.2, 2.2 and 2.6 real permittivity values for 3.2 GHz center frequency, respectively. Nevertheless, these materials have imaginary part of the complex permittivity as follows for 3.2 GHz: 0.18, 0.08, 0.02, 0.02 and 0.05 respectively (Table 2). The focus of the study is especially on low loss characteristic of the spine powders same as for shell powder samples. This characteristic is important for many microwave applications. The proposed spines can be used as microwave laminates due to their ignorable values. In addition, to have different real parts of permittivity can provide alternative materials with various permittivity for microwave circuit designers. The imaginary parts of all samples are much lower with respect to widespread used laminate of FR4 in microwave applications. Since, the spines are natural and waste, this high technology application area provides a new field to utilize them. Besides this, the spines-based powders can be also used to construct novel organic radome due to have low losses as free space. The real part of the permittivity can be adjusted by temperature process as can be seen from Figure 6a. Hence, it is possible to provide required real part of permittivity after temperature process for both laminate and radome applications.

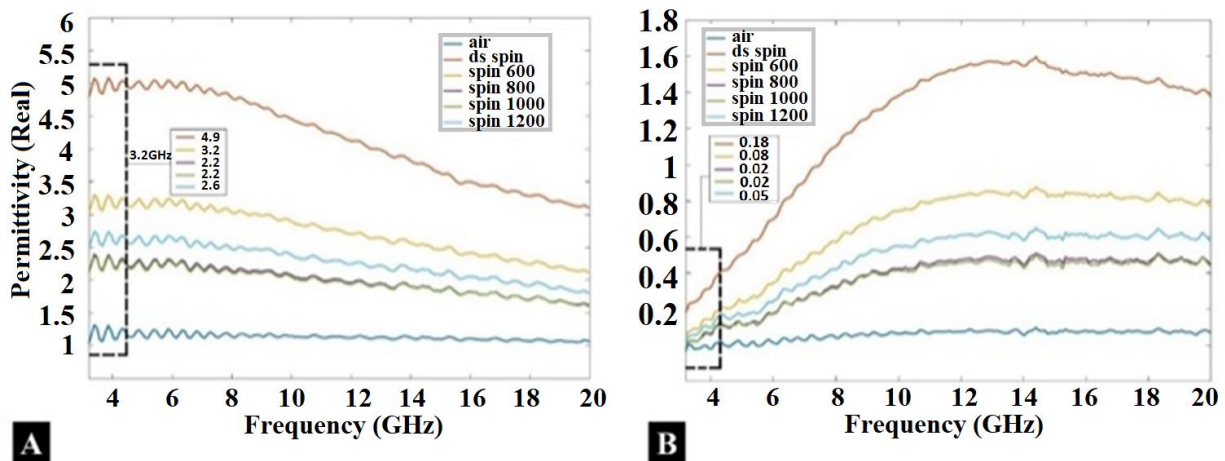


Figure 6. Real (a) and Imaginary (b) parts of measured spine samples in frequency range of 3.2-20 GHz

Table 2 The comparison of real and imaginary parts of samples with commercial substrates

Samples	Dielectric constant (Real) at 3.2 GHz	Dielectric constant (Imag) at 3.2 GHz
FR-4	4.3	0.1075
Roger 5880	2.2	0.00198
Ds-spine	4.9	0.18
Spine-600	3.2	0.08
Spine-800	2.2	0.02
Spine-1000	2.2	0.02
Spine-1200	2.6	0.05

The results obtained from complex permittivity measurements clearly shows that heated shell and spine powder materials are good candidates for microwave applications as substrate layer. These materials have low loss characteristics and can be used in many research applications as military radar, sensor, communication, and medical applications.

3 Conclusion

In this research, the microwave constitutive parameters of a biomaterial have been examined under two approaches in the 3.2-20 GHz band. These two materials are different type of powders which are shell and spines of invasive long-spined sea urchin. These powder samples from the bio-invaders were prepared and calcined at different temperatures as 600, 800, 1000 and 1200 C°. These biomaterials have been obtained because of grinding the shell and spines of sea urchin were turned into powder. The complex dielectric parameters of these classified biomaterials have been investigated in the 3.2-20 GHz frequency range with the open-ended coaxial probe method. The measured dielectric results clearly show that these biomaterials have a high usage potential in the microwave frequency region. The measured complex permittivity properties of the samples of shell and spines of invasive long-spined sea urchin have demonstrated that the samples can be utilized in development of high-quality microwave radomes

with high impedance matching to air and low loss microwave substrates to design microwave circuits and resonators.

Acknowledgment

The authors are thankful to the Center Laboratory of Iskenderun Technical University for providing the facility to carry out the work.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity rate (iThenticate): % 10

References

- [1] G. H. Copp, V. Kováč, H. Ojaveer and H. Rosenthal, The introduction, establishment, dispersal and impact of introduced non-native fishes. *Journal of Applied Ichthyology*, 21 (4), 241-241, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2005.00693.x>
- [2] M. J. Kennard, A. H. Arthington, B. J. Pusey and B. D. Harch, Are alien fish a reliable indicator of river health? *Freshwater Biology*, 50(1), 174-193. 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01293.x>
- [3] M. E. Çinar, M. Bilecenoğlu, M. B. Yokeş, B. Öztürk, E. Taşkin, K. Bakır, A. Doğan and Ş. Açık, Current status (as of end of 2020) of marine alien species in Turkey. *PLoS ONE*, 16 (5), e0251086, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251086>
- [4] F. E. Kayhan and N. D. Yön Ertuğ, Türkiye Kiyılarında İstilacı Zehirli Balon Baliği (*Lagocephalus sceleratus* Gmelin, 1789). *Doğanın Sesi* (8), 35-46, 2021.
- [5] M. F. Huseyinoglu, V. Demir, Y. Arda, M. Draman and M. B. Yokes, Spatio-temporal distribution of lionfish, *Pterois miles* (Bennett, 1828) in Kas-Kekova Special Environmental Protected Area, Turkey. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 254, 107331, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107331>
- [6] B. Yokes and B. S. Galil, The first record of the needle-spined urchin *Diadema setosum* (Leske, 1778) (Echinodermata: Echinoidea: Diadematidae) from the

- Mediterranean Sea. Aquatic Invasions, 1(3), 188–190, 2006. <https://doi.org/10.3391/ai.2006.1.3.15>
- [7] H. A. Lessios, B. D. Kessing and J. S. Pearse, Population structure and speciation in tropical seas: Global phylogeography of the sea urchin *Diadema*. In *Evolution* 55 (5), 955-975, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2001.tb00613.x>
- [8] C. Turan, D. Ergüden and N. Uygur, On the occurrence of *Diadema setosum* (Leske, 1778) in Antakya Bay, Eastern Mediterranean Sea. *Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment*, 17(1), 78–82, 2011.
- [9] S. Yapıcı, Unusual Observation of the Alien Sea Urchin *Diadema setosum* (Leske, 1778) in the Aegean Sea: Recent and Recorded Occurrences. *Thalassas*, 34(2), 267–269, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41208-017-0060-z>
- [10] M. L. Artüz and O. B. Artüz, First and Northernmost Record of *Diadema setosum* (Leske, 1778) (Echinodermata: Echinoidea: Diadematidae) in the Sea of Marmara. *Thalassas*, 35(2), 375–379, 2019. <https://doi.org/10.1007/s41208-019-00137-3>
- [11] Kaatze, U. (2010). Techniques for measuring the microwave dielectric properties of materials. *Metrologia*, 47(2), S91. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/2/S10>
- [12] Grant, E., & Halstead, B. J. (1998). Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating. *Chemical society reviews*, 27(3), 213-224. <https://doi.org/10.1039/A827213Z>





Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı gerçek-zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) tekniğinin performansının değerlendirilmesi ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı

Evaluation of the performance of the real-time precise point positioning (RT-PPP) technique based on low-cost GNSS observations and contribution of multi-GNSS observations

Mert Bezcioglu^{1,*} 

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli Türkiye

Öz

Bu çalışma, düşük maliyetli Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (Global Navigation Satellite Systems -GNSS-) gözlemlerine dayalı Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (Real-Time Precise Point Positioning -RT-PPP-) tekniğinin konum belirleme performansının araştırılmasını ve yönteme çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını sunmaktadır. Çalışmada, iki adet düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteni kullanılarak statik ve kinematik modda iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen iki deney setinde de Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Positioning System -GPS-) ve GPS+Galileo gözlemlerine dayalı olarak IGS03 akışından elde edilen gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmelerinden elde edilen ürünlerle RT-PPP çözümleri gerçekleştirilmiş ve bu sonuçlar, GPS+Galileo gözlemlerine dayalı Gerçek-Zamanlı Kinematik (Real-Time Kinematic -RTK-) verileri ile karşılaştırılmıştır. Statik modda gerçekleştirilen deneyin bulguları, çoklu-GNSS gözlemlerinin sadece-GPS gözlemlerine kıyasla yaklaşık olarak 30 dakika daha erken yakınsadığını ve sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla ± 3 , ± 11 ve ± 6 cm mertebesinde daha hassas konum doğruluğu sağladığını açıkça göstermektedir. Kinematik deney sonuçları ise çoklu-GNSS gözlemlerinin tek sisteme kıyasla elde edilen konum doğruluğunu yatay ve düşey bileşenler için sırasıyla %33 ve %25 oranında iyileştirdiğini ifade etmektedir. Ancak, her iki deneyden elde edilen sonuçların dm mertebesinde olduğu göz önüne alındığında, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin yüksek doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalarda yeterli olmayacağını, buna karşılık navigasyon uygulamaları için yeterli doğruluk sağladığı açıktır.

Anahtar kelimeler: GNSS, Düşük-maliyetli GNSS, RTK, RT-PPP, u-blox

1 Giriş

Hassas Nokta Konum Belirleme (Precise Point Positioning -PPP-), rölatif konum belirleme yönteminin aksine sabit bir Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (Global

Abstract

This study presents an investigation of the positioning performance of the Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) technique based on low-cost Global Navigation Satellite Systems (GNSS) observations and the contribution of multi-GNSS observations to the method. In the study, two different experiments were performed in static and kinematic modes employing two low-cost u-blox ZED-F9P receivers and ANN-MB-00 antennas. In both experiments, RT-PPP solutions were performed using the products obtained from the real-time precise orbit and clock corrections from the IGS03 stream based on Global Positioning System (GPS) and GPS+Galileo observations, and these results were compared with the Real-Time Kinematic (RTK) data based on GPS+Galileo observations. The findings of the experiment realized in static mode clearly demonstrated that the multi-GNSS observations converge about 30 minutes earlier than GPS-only observations and provide approximately ± 3 , ± 11 , and ± 6 cm more precise position accuracy for the east, north, and up components, respectively. The kinematic test results indicated that the multi-GNSS observations improved the position accuracy obtained compared to a single system by 33% and 25% for horizontal and vertical components, respectively. However, considering that the results obtained from both experiments are in the order of dm, it is clear that the RT-PPP technique based on low-cost GNSS observations will not be sufficient in geodetic applications that require high accuracy, whereas it provides sufficient accuracy for navigation applications.

Keywords: GNSS, Low-cost GNSS, RTK, RT-PPP, u-blox

Navigation Satellite Systems -GNSS-) istasyonu gibi harici bir altyapı gerektirmeden tek GNSS alıcısından gelen gözlemleri kullanarak yüksek hassasiyette konum belirlemeye olanak sağlayan oldukça güçlü bir tekniktir [1-3]. Son yıllarda PPP tekniğinin seyrüsefer uygulamaları [4,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mbezcioglu@gtu.edu.tr (M. Bezcioglu)
Geliş / Received: 06.06.2023 Kabul / Accepted: 04.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1310577

5], hassas tarım [6], dinamik davranışların ve deprem kaynaklı şiddetli yer değiştirmelerinin belirlenmesi [7, 8] ve atmosfer [9, 10] çalışmaları gibi birçok alanda kullanılabilirliği gerçekleştirilen çalışmalar ile birlikte öne sürülmüştür. Ek olarak, PPP tekniği yüksek hassasiyette konum belirlemek için hassas yörünge ve saat düzeltmelerine ihtiyaç duymaktadır [11]. Ancak Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service -IGS-) gibi farklı analiz merkezleri tarafından kullanıcılara sunulan ultra-rapid, rapid ve final ürünler sırasıyla 2 saat, 17 saat ve 13 günlük bir gecikme ile GNSS kullanıcısı ile paylaşılmaktadır ki, bu durum söz konusu yörünge ve saat ürünlerinin gerçek-zamanlı uygulamalar için kullanışlı olmayacağı anlamına gelmektedir [12].

Gerçek-zamanlı olarak tek GNSS alıcısı ile konum belirlemeye yönelik yükselen ilginin bir sonucu olarak IGS tarafından 2000'li yılların ortasında Gerçek Zamanlı Pilot Projesi (Real Time Pilot Project -RTPP-) başlatılmış ve bu projenin sonucunda yaklaşık olarak on yıldır Deniz Hizmetleri Radyo Teknik Komisyonu (Radio Technical Commission for Maritime Services -RTCM-) aracılığı ile GNSS kullanıcıları gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmelerine erişim imkanına sahiptir [13, 14]. Gerçek-zamanlı ürünler Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Positioning System -GPS-) sistemine saat bilgisi için 0.3 ns ve yörünge bilgisi için 5 cm doğrulukta destek vermektedir [15]. Ek olarak, gerçek-zamanlı ürünler kullanılarak gerçekleştirilen Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (Real-Time Precise Point Positioning -RT-PPP-) tekniğinin statik ve kinematik moddaki konum belirleme performansı [16–18], deprem ve tsunami kaynaklı güçlü yer sarsıntılarını belirleyebilme yeteneği [19, 20], yapı sağlığı izleme alanındaki kullanılabilirliği [21, 22] ve atmosfer [23–25] çalışmalarındaki başarısını inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Öcalan ve Soycan [26], RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansını incelemek amacıyla sabit bir istasyondan elde edilen verileri BNC v2.5 yazılımı ile değerlendirmiş ve RT-PPP yönteminin yatay ve düşey bileşenlerde cm mertebesinde konum bilgisi elde etmeye olanak sağladığını ileri sürmüşlerdir. Alçay [27], IGS-Gerçek-zamanlı Servis (Real-Time Service -RTS-) aracılığı ile elde edilen 7 farklı istasyondan elde ettiği verileri BNC v.2.12.6 yazılımı ile değerlendirmiş ve RT-PPP tekniğinin yakınsama süresi sonunda ± 10 cm doğruluk sağladığını ifade etmiştir. Alçay ve Atiz [28], sabit bir IGS istasyonundan elde ettiği verileri BNC v2.12, RTKLIB v2.4.3 ve PPP-WIZARD v1.4.2 yazılımları ile sadece-GPS gözlemlerine dayalı olarak gerçek-zamanlı olarak değerlendirmiş ve 1 saatlik bir yakınsama süresinin ardından BNC ve RTKLIB yazılımları ile yatay bileşenlerde ± 10 cm, düşey bileşende ise ± 20 cm elde edildiğini belirtmişlerdir. Alkan vd. [29], Antarktika bölgesindeki bir IGS istasyonundan elde ettiği verileri BNC v2.12 yazılımı ile sadece-GPS, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou uydu kombinasyonları ile değerlendirmiş ve sonuçların RT-PPP yönteminin kullanıcıya kullanılan uydu sistemine bağlı olarak yatay bileşenlerde ± 3 - ± 12 cm, düşey bileşende ise ± 5 - ± 17 cm aralığında konum bilgisi sağladığını öne sürmüşlerdir. İnal

vd. [30], jeomanyetik aktivitelerin yoğun olduğu bir günde 3 farklı IGS istasyonundan elde ettiği gözlemleri RTKLIB yazılımı ile gerçek-zamanlı şartlar altında farklı uydu sistemlerinin kombinasyonunu da dikkate alarak sonradan değerlendirmiş ve RT-PPP tekniğinin dm mertebesinde doğruluk sağladığını bildirmişlerdir.

PPP yöntemi kullanarak hassas ve doğru sonuçlar elde etmek ve GNSS gözlemlerinin en önemli hata kaynaklarından biri olan iyonosfer hatasını elemine etmek için genellikle yüksek maliyetli üst düzey bir çift/çoklu frekans gözlemlerini toplayabilme yeteneğine sahip GNSS alıcısı kullanılmaktadır. Üst düzey GNSS alıcılarının yüksek maliyeti ise geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesinin önündeki en büyük engeldir. Tek-frekanslı GNSS alıcıları bugüne kadar düşük-maliyetli pazarda hala baskın olmasına rağmen, gelişen teknoloji ile birlikte son zamanlarda düşük maliyetli ve çoklu-GNSS gözlemlerini toplayabilme yeteneğine sahip çift-frekanslı GNSS modülleri ortaya çıkmıştır [31]. Örneğin, yaklaşık olarak 5 yıl önce İsviçreli bir firma olan u-blox tarafından yaklaşık olarak 200 USD maliyetli ve çift-frekanslı GNSS alıcısı ZED-F9P piyasaya sürülmüştür [32]. Mevcut tüm GNSS sistemlerinden gözlem toplayama olarak sağlayan bu alıcısının ise birçok farklı alanda uygulanabilirliği test edilmiş durumdadır [33]. Janos ve Kuras [32], u-blox ZED-F9P alıcısının zorlu koşullar altında Gerçek-Zamanlı Kinematik (Real-Time Kinematic -RTK-) modundaki performansını çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı olarak hem jeodezik hem de düşük maliyetli antenler ile test etmiş ve söz konusu alıcının RTK modunda yatayda cm, düşeyde ise dm mertebesinde doğruluk ve hassasiyet sağladığını belirtmişlerdir. Sanna vd. [34], u-blox ZED-F9P alıcısının statik ve kinematik moddaki RTK yeteneğini çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı olarak jeodezik ve düşük maliyetli antenler ile incelemiş ve yatay ve düşey bileşenlerde sırasıyla ± 3 cm ve ± 10 cm'lik duyarlılık elde edebileceğini ifade etmişlerdir. Nie vd [31], u-blox ZED-F9P alıcısının statik ve kinematik moddaki RT-PPP performansını GPS ve GLONASS uydu kombinasyonuna dayalı olarak düşük maliyetli anten ile RTK tekniği ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve buradan elde edilen sonuçların iyileştirilmesi için yeni bir model önermişlerdir. Kinematik modda elde ettikleri ham RT-PPP sonuçlarında sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla ± 47 cm, ± 23 cm ve ± 65 cm'lik doğruluk elde ettiklerini, önerdikleri yeni yöntem ile bu sonuçların yatay bileşenlerde ortalama olarak 7 cm düşey bileşende ise 30 cm'lik iyileşme sağlanabileceğini öne sürmüşlerdir. Di vd [35], u-blox ZED-F9P alıcısının seyrüsefer uygulamalarındaki RT-PPP performansını jeodezik antenden elde edilen gözlemler ile Antarktika bölgesinde GPS ve GPS+GLONASS+BeiDou uydu kombinasyonlarına dayalı olarak final ürünlere bağlı sonradan-değerlendirme PPP sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve sadece-GPS sonuçlarında dm mertebesinde doğruluk elde edilirken, çoklu-GNSS gözlemlerinde mm mertebesinde doğruluk elde edildiğini ifade etmişlerdir. Hohensinn vd. [36], u-blox ZED-F9P alıcısının dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini RT-PPP tekniği ile jeodezik ve düşük maliyetli anten kullanarak

değerlendirmiş ve u-blox ZED-F9P alıcısının jeodezik anten ile daha başarılı sonuçlar elde edebileceğini öne sürmüşlerdir. Son olarak Oku Topal vd [37], u-blox ZED-F9P alıcısından elde edilen gözlemlere dayalı PPP tekniğinin yatay yönlü kalıcı deplasmanları tespit edebilme yeteneğini ultra-rapid, rapid ve final ürünler ile değerlendirmiş ve düşük maliyetli-GNSS alıcılarının jeodezik antenlere güçlü bir alternatif olabileceğini vurgulamışlardır.

Mevcut literatür incelendiğinde yüksek bütçeli jeodezik anten ve alıcılar ile RT-PPP tekniğinin performansının ve ve çoklu-GNSS gözlemlerinin ilgili yöntemle olan katkısının yeterince değerlendirildiği görülmektedir. Ancak, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı statik ve kinematik moddaki RT-PPP tekniğinin performansı ve bu yöntemle çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısının RTK tekniği ile karşılaştırmalı bir analizinin henüz detaylı bir şekilde incelenmediği son derece açıktır. Bu çalışmada mevcut literatürdeki çalışmalardan farklı olarak ilk defa düşük maliyetli GNSS alıcısı ve antenine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansı RTK tekniği ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve GPS gözlemlerine Galileo uydu takımı yıldızlarının katkısı araştırılmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda önce statik, daha sonra da kinematik modda gerçek-zamanlı olarak deneyler gerçekleştirilmiş ve RT-PPP sonuçları RTK çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmayı mevcut literatürdeki çalışmalardan ayıran en önemli özelliklerden biri, çalışma kapsamında elde edilen G (GPS) ve GE (GPS+Galileo) RT-PPP ve GE RTK sonuçların gerçek-zamanlı modda eş zamanlı olarak edilmesi ve RT-PPP tekniğinin performansının RTK yöntemine ne kadar yaklaşabildiğinin detaylı olarak incelenmesidir.

2 Materyal ve metot

2.1 RT-PPP tekniği

RT-PPP tekniğinin matematiksel modeli öncelikle Denklem (1) ve Denklem (2)'de ifade edilen iyonosfer-bağımsız çift-frekanslı GNSS ham kod ve taşıyıcı faz gözlemlerine dayanmaktadır. Aşağıda belirtilen denklemlerde L_3 ve P_3 iyonosfer-bağımsız faz ve kod ölçülerini temsil etmektedir. ρ alıcı-uydu arasındaki mesafeyi ifade ederken, c ışığın uzay boşluğundaki hızına karşılık gelmektedir. dt^s ve dt^r sembolleri sırasıyla uydu ve alıcı saat hatasını, b_*^r ve b_*^s ifadeleri ise sırasıyla alıcı ve uydu kayıklıklarını ifade etmektedir. T gözlemlerde meydana gelen troposferik gecikmeyi temsil ederken, ε_{L3} ve ε_{P3} sembolleri faz ve kod ölçülerinde gürültülere karşılık gelmektedir.

$$L_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T - \lambda_3 N_3 + b_{L3}^r - b_{L3}^s + \varepsilon_{L3} \quad (1)$$

$$P_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T + b_{P3}^r - b_{P3}^s + \varepsilon_{P3} \quad (2)$$

RT-PPP tekniği, temelde geleneksel-PPP tekniğine dayandığı için gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmelerine ihtiyaç duymaktadır. RT-PPP yöntemi için gerekli düzeltmeler bu amaç doğrultusunda ortaya çıkmış çeşitli protokoller kullanılarak kullanıcıya sunulmaktadır.

Gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmeleri, bu protokoller vasıtasıyla GNSS-kullanıcısına sunulan ve gözlemler sırasında elde edilen yayın yörünge bilgilerinin düzeltmelerini içermektedir. Gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat ürünleri A_{SSR} sembolü ile ifade edilmekte ve t_0 referans epogunda ve RTCM-Durum Uzay Temsili (State Space Representation -SSR-) formatında kullanıcıya iletilir. İletilen bilgilerde ilgili düzeltmelerin uydu yörüngesi boyunca (δ_a), dünya yer merkezini birleştiren doğrultu boyunca (δ_r), ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik (δ_c) doğrultuda bilgileri ve bu bilgilerin hızları ($\delta_{\dot{r}}, \delta_{\dot{a}}, \delta_{\dot{c}}$) efemeris yayın zamanını (IOD) bilgileri ile yer almaktadır [15, 38].

$$A_{SSR} = (t_0, IOD) = (\delta_r, \delta_a, \delta_c, \delta_{\dot{r}}, \delta_{\dot{a}}, \delta_{\dot{c}}, c_0, c_1, c_2) \quad (3)$$

Denklem (3)'te yer alan c_0, c_1 ve c_2 sembolleri hassas saat düzeltme bilgilerini elde edebilmek için kullanılan polinom katsayılarıdır. A_{SSR} bilgisinden faydalanılarak t ölçme epogundaki uydu yörüngesi boyunca, doğrultu boyunca ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik doğrultudaki yörünge düzeltmeleri Denklem (4)'te ifade edildiği gibi elde edilebilir.

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta A \\ \delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_a \\ \delta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{\dot{r}} \\ \delta_{\dot{a}} \\ \delta_{\dot{c}} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (4)$$

RTCM-SSR hassas yörünge ürünleri kullanıcıya uydu sabit-sistemde iletildiği için bu düzeltmelerin uydu yörüngesi boyunca, dünya yer merkezini birleştiren doğrultu boyunca ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik doğrultudaki birim vektörler (e_A, e_c, e_r) kullanılarak Yer-Merkezli, Yer-Sabit (Earth-Centered, Earth-Fixed -ECEF-) koordinat sistemine dönüşümü sağlanmalıdır.

$$e_A = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|}, \quad e_c = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|}, \quad e_r = e_A \times e_c \quad (5)$$

Denklem (5)'te yer alan \dot{r} ve r sembolleri sırasıyla yayın yörünge bilgileri kullanılarak elde edilen uydu pozisyon hızını ve uydu pozisyonunu temsil etmektedir. Son aşamada ise, gerçek-zamanlı olarak kullanıcıya sunulan düzeltmelerin uydu-sabit sistemden jeosentrik koordinat sistemine dönüştürülmesinin ardından gerçek-zamanlı hassas yörünge bilgileri elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} + [e_r \quad e_A \quad e_c] \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta A \\ \delta C \end{bmatrix} \quad (6)$$

Denklem (6)'da yer verilen p ve b sembolleri sırasıyla hassas ve yayın uydu pozisyonlarını temsil etmektedir. Bu aşamada elde edilen hassas yörünge bilgilerinin Anten Faz Merkezi (Antenna Phase Centre -APC-) veya Kütle Merkezi (Center of Mass -CoM-) olarak kullanıcıya sunulabileceğini ifade etmek gerekmektedir. APC düzeltmeleri direkt olarak

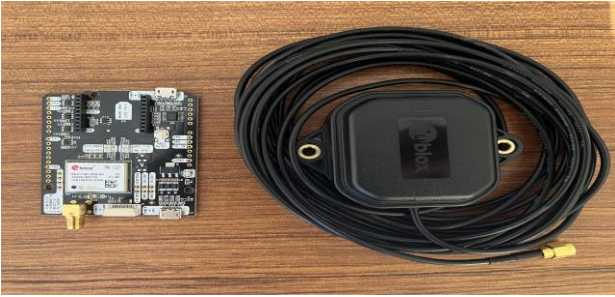
konum bilgisi elde etmek için kullanılırken, CoM bilgileri ek olarak faz merkezi kayıklığı bilgisi gerektirmektedir.

Son aşamada ise **Denklem (7)**'de ifade edildiği gibi, ölçü epoğundaki hassas saat bilgilerini elde etmek amacıyla Δ_{SSR} düzeltmelerinin içinde yer alan polinom katsayıları kullanılmaktadır. Söz konusu denklemde T_b ve T_p sembolleri sırasıyla gerçek-zamanlı olarak elde edilen yayın ve hassas saat düzeltme bilgilerini temsil etmektedir.

$$dT_p = dT_b + \frac{c_0 + c_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2}{c} \quad (7)$$

2.2 Deney tasarımı

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının incelenmesi ve RT-PPP tekniğine çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen deneyler çalışmanın bu bölümünde okuyucuya sunulmaktadır. Çalışmanın ana fikri doğrultusunda statik ve kinematik modda olmak üzere iki farklı deney 29.05.2023 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde gerçekleştirilmiştir. Söz konusu iki deneyde de düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteni kullanılmıştır (**Şekil 1**). İ

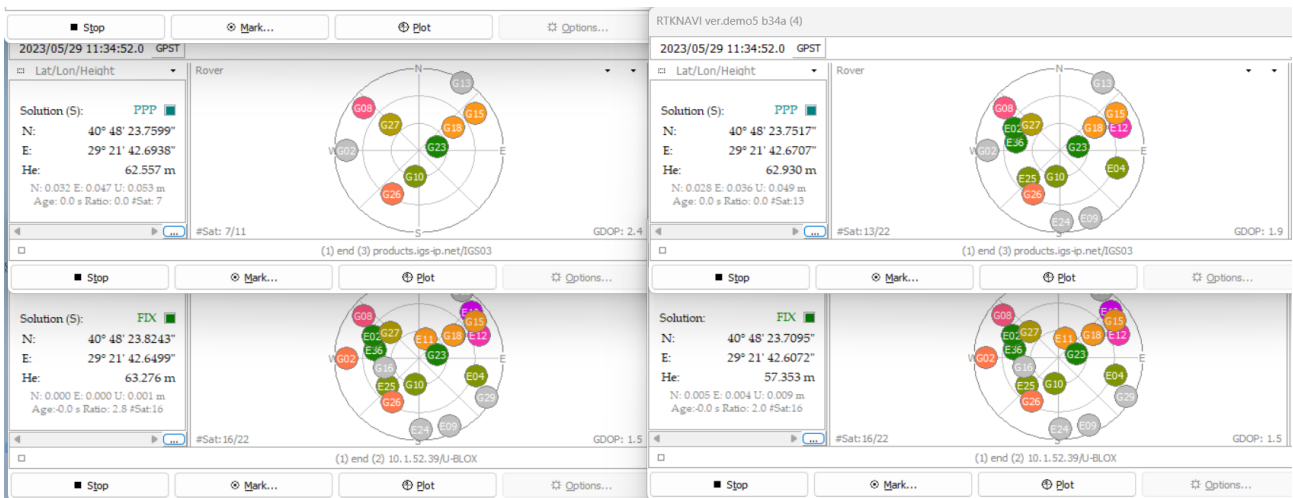


Şekil 1. Deneylerde kullanılan anten ve alıcı

lk deney, yukarıda da ifade edildiği gibi statik modda gerçekleştirilmiştir. Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde bulunan Harita Mühendisliği binasının çatısına biri sabit

değeri gezici olmak üzere yaklaşık olarak 20 m ara ile 1 Hz örneklem aralığına ayarlanmış, yansıtıcı yüzey etkisinden uzak ve çevresinde gözlem kaybına engel olabilecek herhangi bir obje olmayan iki alıcı yerleştirilmiş ve söz konusu alıcılar çift-frekanslı gözlemler elde etmişlerdir. Sabit alıcıdan elde edilen gözlemler çatının alt katında bulunan bir masaüstü bilgisayara aktarılmış ve bu bilgisayar üzerinden NTRIP aracılığı ile çatıda yer alan dizüstü bilgisayara iletilmiştir. Gezici alıcı verileri ise doğrudan bağlantı ile bilgisayara aktarılmıştır. Sabit ve gezici alıcıdan elde edilen gözlem verileri **Şekil 2**'de belirtildiği RTKLIB demo5_b34a yazılımının RTKNAVI modülünde RTK ve RT-PPP modlarında GPS (G) ve GPS+Galileo (GE) uydu kombinasyonlarına dayalı bir şekilde eş zamanlı olarak gerçek-zamanlı değerlendirilmiştir [39]. Statik deney yaklaşık olarak 130 dakika sürmüştür ve gözlemler 5°'lik uydu yükseklik açısı altında toplanmıştır. Deneyler sırasında gözlemlenmiştir. Bu süre içerisinde Galileo uydularının gözlemlenme sayısı ise 3 ile 7 arasındadır ve ortalama olarak 6 Galileo uydusundan gözlem elde edilmiştir. Ek olarak, sadece-GPS gözlemleri sırasında elde edilen ortalama PDOP değeri 1.3 iken, GPS+Galileo gözlemlerinin PDOP değeri 1.0'dır.

Düşük maliyetli GNSS alıcısı ve anteninden elde edilen gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının ve bu performansa çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısının değerlendirilmesi kapsamında statik deneylere ek olarak kinematik bir deney de gerçekleştirilmiştir. Statik deneyler sırasında kurulan sabit istasyon verisi kesintisiz bir şekilde bu deney içinde gözlem toplamaya devam etmiştir. Gezici anteni ise **Şekil 3**'te gösterildiği gibi bir aracın üzerine monte edilmiştir. İlgili şekilde aracın içindeki bir dizüstü bilgisayara gezici alıcısının verileri doğrudan aktarılırken, statik deneylerde olduğu gibi sabit alıcının gözlemleri NTRIP akışından aracın içerisinde bulunan bilgisayara iletilmiştir. Kinematik deney sırasında alıcılar statik deneyde olduğu gibi 1 Hz örneklem aralığında gözlem elde etmişlerdir.



Şekil 2. Statik deneyler sırasında gerçekleştirilen çözümlerden bir görünüm (Sol üst: RT-PPP G, Sağ üst: RT-PPP GE, Sol alt: RTK GE)



Şekil 3. Kinematik deney testinde kullanılan araç/düşük maliyetli GNSS anteni (sol) ve deney rotası (sağ)

Statik deneylerin gerçekleştirilmesine benzer bir şekilde, kinematik deneyde de RTK ve RT-PPP çözümleri için RTKLIB demo5_b34a yazılımının RTKNAVI modülü kullanılmıştır. Şekil 4, kinematik deneyler sırasında elde edilen çözümlerden bir anı içermektedir. Kinematik deneyler sırasında çözümler başlatıldıktan sonra yaklaşık olarak 20 dakika boyunca araç hareketsiz olarak bekletilmiş ve daha sonrasında da Şekil 3'te belirtilen rota yaklaşık olarak 15 dakika boyunca takip edilmiştir. Deney sırasında statik deneye benzer şekilde uydu gözlemleri 5°'lik uydu yükseklik açısı altında toplanmıştır. Hareketsiz olarak beklenen sürelerde dahil olmak üzere kinematik deney sırasında GPS ve Galileo uydu takımı yıldızları için ortalama olarak 6 uydu gözlemlenmiştir. Kinematik deneyler sırasında sadece-GPS gözlemlerinin ortalama PDOP değeri 1.4 iken, GPS+Galileo gözlemlerinin ortalama PDOP değeri 1.0'dır.



Şekil 4. Kinematik deneyler sırasında gerçekleştirilen çözümlerden bir görünüm (Üst: RT-PPP GE, Alt: RT-PPP G)

Tablo 1. RTK çözümleri için seçilen değerlendirme parametreleri

	Konumlama Modu	RTK Statik / Kinematik
	Frekanslar / Filtre Tipi	L1+L2 / Forward
Çözüm Parametreleri	Yükseklik Açısı (°) / SNR Maskesi (dBHz)	5° / OFF
	Alıcı Dinamikleri / Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	OFF / OFF
	İyonosferik Düzeltme	Broadcast
	Troposferik Düzeltme	Saastamoinen
	Uydu Yörünge/Saat	Broadcast
	Tamsayı Faz Belirsizliği Çözümü	Continuous
	Belirsizliği Çözmek için Min. Oran Testi Değeri	2
Başlangıç Faz Belirsizliği Parametreleri ve Eşik Değerleri	Belirsizlik Çözümü için Min. Kitlenme/ Kesme Açısı (°)	0 / 0
	Belirsizliği Sıfırlamak için Kesinti/ Faz Sıçraması Eşik Değeri (m)	5 / 0.050
	İki İstasyon Arasındaki Farkların Maks. Değeri (s)	30.0
	GDOP Eşiği / Kalman Filtresi Innov. Eşiği (m)	30.0 / 30.0
Ölçü Hataları (1-sigma)	Maks. # Amb. İter. /# Filtre İter.	1 / 1
	Kod/Faz Hata Oranı L1/L2	100.0 / 100.0
	Kod/Faz Hatası a+b/sinE1 (m)	0.003 / 0.003
	Kod/Faz Hatası /Baz Vektörü (m/10km)	0.000
	Doppler Frekansı (Hz)	10000
Ölçü Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s))	Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)	10.0 / 10.0
	Taşıyıcı Faz (cycle)	0.0001
	Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)	0.001
	Zenith Troposferik Gecikme (m)	0.0001

Tablo 2. RT-PPP çözümleri için seçilen değerlendirme parametreleri

	Konumlama Modu	PPP-Statik/Kinematik	
Çözüm Parametreleri	Frekanslar / Filtre Tipi	L1+L2 / Forward	
	Yükseklik Açısı (°) / SNR Maskesi (dBHz)	5° / OFF	
	Alıcı Dinamikleri / Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	ON / Solid+OTL	
	İyonosferik Düzeltme	Iono-Free LC	
	Troposferik Düzeltme	Estimate ZTD+Grad	
	Uydu Yörünge/Saat	Broadcast +SSR APC	
	Uydu Anten Faz Merkezi Düzeltmesi	✓	
	Alıcı Anten Faz Merkezi Düzeltmesi	✓	
	Faz Salınım Etkisi Düzeltmesi	✓	
	Gölgelenen Uyduları Reddet (GPS Block IIA için)	✓	
	Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)	✓	
	DBC Düzeltmesi	✓	
	Eşik Değerleri	Belirsizliği Sıfırlamak için Kesinti / Faz Sıçraması Eşik Değeri (m)	5 / 0.050
		GDOP Eşiği / Kalman Filtresi Innov. Eşiği (m)	30.0 / 30.0
# Filtre İter.		1	
Ölçü Hataları (1-sigma)	Kod/Faz Hata Oranı L1/L2	100.0 / 100.0	
	Kod/Faz Hatası a+b/sinEl (m)	0.003 / 0.003	
	Kod/Faz Hatası /Baz Vektörü (m/10km)	0.000	
	Doppler Frekansı (Hz)	10.000	
Ölçü Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s))	Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)	10.0 / 10.0	
	Taşıyıcı Faz (cycle)	0.0001	
	Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)	0.001	
	Zenith Troposferik Gecikme (m)	0.0001	

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının değerlendirilmesinde referans yöntem olan RTK tekniği için yukarıda da belirtildiği üzere GPS ve Galileo uydu takımı yıldızlarının kombinasyonundan yararlanılmış ve ilgili yazılımda statik ve kinematik deneylerde tercih edilen işlem parametrelerine ise **Tablo 1**'de yer verilmiştir. Statik deneyler sırasında elde edilen tüm epoklar dikkate alındığında 130 dakikalık gözlem süresinin yaklaşık olarak %95'inde başlangıç faz belirsizliği değeri tamsayı olarak çözülmüştür. Kinematik deneylerde ise RTK tekniği tarafından elde edilen başlangıç faz belirsizliği çözüm oranı ise %89'dur. Her iki deneyde de RTK tekniği tarafından çözülemeyen başlangıç faz belirsizliğinin büyük bir bölümü deney sürecinin ilk aşamalarına karşılık gelmektedir.

Çalışmanın amacı ve kapsamı doğrultusunda gerçekleştirilen statik ve kinematik deneylerde RT-PPP çözümleri için gerekli olan gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmeleri products.igs-ip.net:2101 aracılığı ile çoklu-GNSS gözlemlerine destek verme yeteneğine sahip IGS03 akışından elde edilmiştir. RT-PPP çözümleri için statik ve kinematik deneylerde kullanılan değerlendirme parametreleri ise **Tablo 2**'de özetlenmiştir. Çalışma kapsamında yürütülen iki deney sırasında da RT-PPP çözümleri herhangi bir kesintiye uğramamıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteninden elde edilen GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının değerlendirilmesi ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı bu bölümde değerlendirilecektir. Çalışmanın amacı doğrultusunda bölüm 2.2'de sunulan deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve G ve GE gözlemlerine dayalı elde edilen RT-PPP sonuçları GE gözlemlerine dayalı elde edilen RTK sonuçları ile karşılaştırılmıştır. **Şekil 5**, statik deneyler sırasında farklı uydu kombinasyonlarına dayalı elde edilen RT-PPP çözümleri ile RTK sonuçları arasındaki farkların sağa, yukarı ve h bileşenleri için zaman serisini göstermektedir. Şekilden, her üç bileşen için GE uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniğinin RTK yöntemi ile daha güçlü bir uyum gösterdiği açıkça görülmektedir. Ek olarak, güncel literatürde PPP tekniğinin yakınsama süresinin tespiti için yatay ve düşey bileşenlerde hataların sırasıyla 10 ve 20 cm değerinin altında ardışık olarak 60 epok boyunca kaldığı zaman değeri kabul görmektedir [40]. Ancak bu çalışmada elde edilen gözlemlerin düşük maliyetli GNSS alıcısı ve anteninden elde edildiği göz önünde bulundurularak yatay ve düşey bileşenler için sırasıyla 35 ve 70 cm değerinin altında kaldığı ve bu andan sonra belirlenen bu eşik değerlerinin üzerine

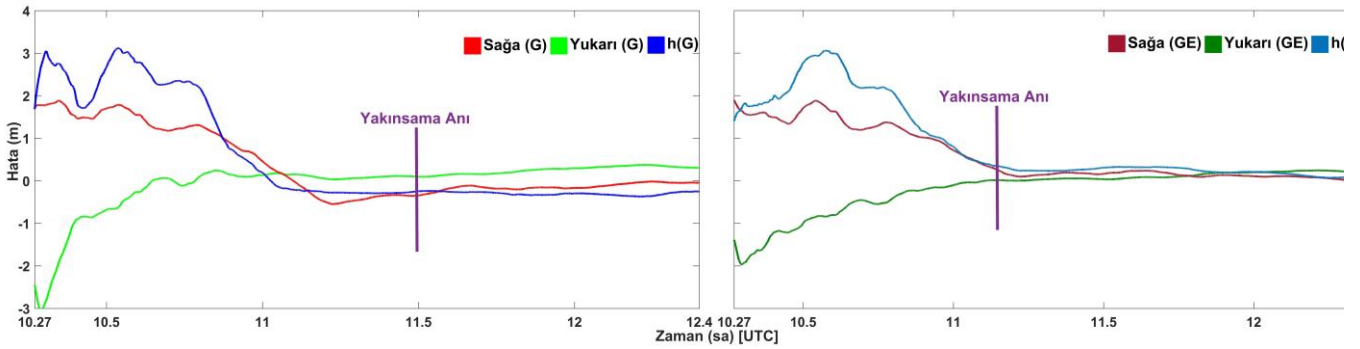
çıkmadığı zaman, yakınsama süresi olarak değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda GPS uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniğinin 77 dakikada yakınsadığı sonucuna varılırken, GPS+Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniğinin 47 dakikada yakınsadığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar, yakınsama süresi açısından çoklu-GNSS gözlemlerinin düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğine olan katkısı açıkça göstermektedir.

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin statik moddaki konum belirleme performansını daha detaylı incelemek ve derinlemesine analiz etmek için, G ve GE uydu kombinasyonlarına dayalı RT-PPP ile referans yöntem olan RTK tekniği arasındaki farkların istatistikî değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir. Burada belirtmek gerekmektedir ki ilgili tabloda elde edilen değerler adil bir karşılaştırma yapmak amacıyla G RT-PPP ve GE RT-PPP tekniklerinin yakınsama sürelerinden sonra elde edilmiştir. Tablodan yatay bileşenler için G RT-PPP yönteminin minimum ve maksimum hatalarının yaklaşık olarak -1 cm ile -35 cm arasında değiştiği görülmektedir. Buna karşılık GE RT-PPP tekniği için bu değerler +8 mm ile +25 cm arasında değişmektedir.

Her iki çözümden yatay bileşen için elde edilen ortalama hata değerleri göz önüne alındığında ise GE uydu kombinasyonu, G uydu kombinasyonundan elde edilen

değerleri sağa ve yukarı bileşenleri için sırasıyla %25 ve %42 oranında iyileştirdiği açıkça görülmektedir. h bileşeni içinse GE RT-PPP tekniğinden elde edilen ortalama hata değerlerinin G RT-PPP'den elde edilenlere kıyasla 9 cm daha düşük olduğu açıktır. G ve GE RT-PPP çözümlerinin KOH (Karesel Ortalama Hata) değerleri incelendiğinde ise GE uydu kombinasyonunun G gözlemlerine olan üstünlüğü göze çarpmaktadır. GE gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinden elde edilen sonuçlar G RT-PPP'den elde edilenleri sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla %17, %42 ve %20 oranında iyileştirmiştir. Elde edilen bu sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin düşük maliyetli GNSS verilerine dayalı RT-PPP tekniğine olan katkısını açık bir şekilde göstermektedir. Ancak genel olarak, her iki kombinasyondan elde edilen RT-PPP sonuçları göz önüne alındığında ve karşılaşılan doğruluk değerleri düşünüldüğünde, statik moda elde edilen düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin mm mertebesinde doğruluk gerektiren jeodezik çalışmalarda başarılı olamayacağı, buna karşılık navigasyon uygulamaları için son derece yüksek doğruluk sağladığı son derece açıktır.

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının değerlendirilmesi amacı doğrultusunda alt başlık 2.2'de de bahsedildiği üzere statik deneye ek olarak kinematik deney de gerçekleştirilmiştir.



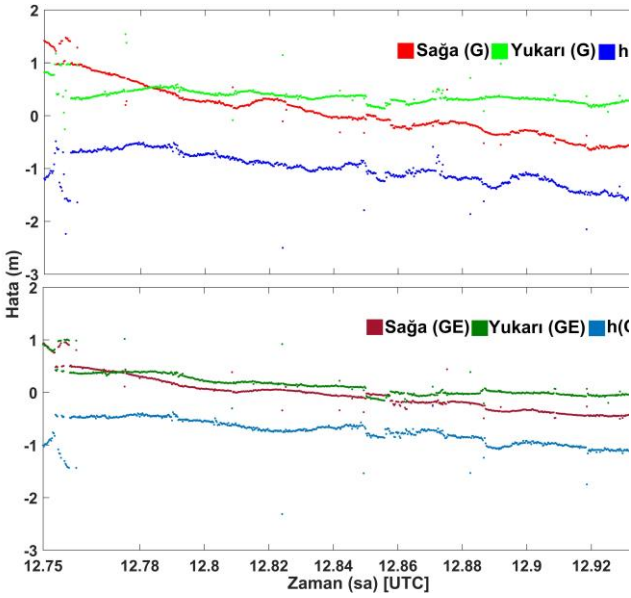
Şekil 5. G ve GE uydu kombinasyonlarına dayalı elde edilen RT-PPP ve RTK sonuçları arasındaki farklar

Tablo 3. RT-PPP çözümleri ve RTK sonuçları arasındaki farkların istatistikî değerleri

	G				GE			
	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)
Sağa	0.150	0.349	0.159	0.184	0.008	0.237	0.124	±0.149
Yukarı	0.093	0.334	0.240	0.255	0.033	0.245	0.150	±0.149
h	0.231	0.369	0.297	0.299	0.054	0.332	0.211	±0.239

Tablo 4. RT-PPP çözümleri ve RTK sonuçları arasındaki farkların kinematik mod için istatistikî değerleri

	G				GE			
	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)
Sağa	0.001	1.476	0.405	0.517	0.000	0.993	0.264	±0.336
Yukarı	0.057	1.539	0.377	0.410	0.000	1.053	0.187	±0.282
h	1.084	2.501	1.037	1.084	0.262	2.317	0.771	±0.809



Şekil 6. Kinematik deney sırasında elde edilen RT-PPP ve RTK sonuçları arasındaki farklar

Şekil 6, kinematik deney sırasında farklı uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniği ve RTK yöntemi arasındaki farkları göstermektedir. İlgili şekilden, GPS ve Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı olarak elde edilen RT-PPP çözümlerinin RTK tekniği ile daha uyumlu olduğu açıkça görülmektedir. Bu bulgu, statik moda benzer şekilde kinematik moda da çoklu-GNSS gözlemlerinin RT-PPP yöntemine olan katkısını doğrulamaktadır. Ancak iki yöntem için de yükseklik bileşeni için RT-PPP tekniğinin yatay bileşenlere kıyasla daha başarısız olduğu görülmektedir. Bu durum, deney sırasındaki gözlem verileri veya statik deneylerde elde edilen yakınsama süresi dikkate alındığında kinematik deneyde kullanılan aracın harekete başlamadan önce yaklaşık olarak 20 dakika hareketsiz kalması ile ilgili olabilir. Bu bulguların harici araştırmacılar ve araştırmalar tarafından doğrulanması gerekmektedir.

Ek olarak, statik deneye benzer şekilde RTK ve RT-PPP çözümleri arasındaki farkların istatistik bulguları elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir. Tablodan, Galileo uydu takımı yıldızının sadece-GPS gözlemlerine olan katkısı açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen ortalama hata değerleri dikkate alındığında çoklu-GNSS gözlemleri sadece-GPS gözlemlerinden elde edilen hata değerlerini üç bileşen için ortalama olarak 20 cm iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca KOH değerleri dikkate alındığında, GPS ve Galileo uydu sistemlerinin kombinasyonuna dayalı RT-PPP çözümleri sadece-GPS gözlemlerine kıyasla sağa yukarı bileşenleri için sırasıyla %35 ve %32 oranında iyileşme sağlarken bu iyileşme değeri yükseklik bileşeni için %26'dır. Burada elde edilen bulgular statik moda karşılaştırılan bulguları doğrulamaktadır. Çoklu-GNSS gözlemleri RT-PPP tekniğine etkin bir şekilde katkı yaparken, düşük maliyetli GNSS anteni ve alıcısından elde edilen gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin kinematik moddaki performansı dikkate alındığında navigasyon ve

seyrüsefer gibi uygulamaların gerektirdiği doğruluğu sağladığı, buna karşılık yüksek hassasiyet ve doğruluk gerektiren jeodezik işler için henüz istenen seviyede olmadığı son derece açıktır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteninden elde edilen GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansı değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlara çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda statik ve kinematik moda iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Söz konusu her iki deneyde de GPS ve GPS+Galileo gözlemlerine dayalı RT-PPP sonuçları elde edilmiş ve elde edilen gözlemler GPS+Galileo gözlemlerine dayalı RTK sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Statik moda elde edilen sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin sadece-GPS gözlemlerine kıyasla yaklaşık 30 dakika daha erken yakınsadığını ve KOH değerleri dikkate alındığında GE gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinden elde edilen sonuçların G RT-PPP'den elde edilenleri sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla %17, %42 ve %20 oranında iyileştirdiğini açıkça göstermiştir. Kinematik deney sonuçları ise statik sonuçlara paralel olarak çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça ifade etmiş ve her üç bileşen için sadece-GPS gözlemlerine kıyasla ortalama olarak 30 cm daha doğru sonuçlar sağlandığı sonucuna varılmıştır. Ancak hem statik hem de kinematik moda elde edilen bulgular düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin mm mertebesinde doğruluk gerektiren jeodezik çalışmalarda başarılı olamayacağını, buna karşılık navigasyon ve seyrüsefer gibi uygulamaların gerektirdiği doğruluğun söz konusu yöntem tarafından sağlandığını açıkça öne sürmektedir.

Teşekkür

Yazar saha çalışmalarındaki desteği için Emre Bozdoğan, Ahmet Yaman ve Yavuz Selçuk Ocak'a, gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat ürünleri için IGS'e ve RTKLIB programı geliştiricilerine teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] S. Malys and P. A. Jensen, Geodetic point positioning with GPS carrier beat phase data from the CASA UNO Experiment, *Geophysical Research Letters*, 17(5), 651–654, 1990, <https://doi.org/10.1029/GL017i005p00651>.
- [2] J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102 (B3), 5005–5017, 1997, <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.
- [3] J. Kouba and P. Héroux, Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products, *GPS Solutions*, 5 (2), 12–28, 2001, <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.

- [4] J. Geng, F. N. Teferle, X. Meng, and A. H. Dodson, Kinematic precise point positioning at remote marine platforms, *GPS Solutions*, 14 (4), 343–350, 2010, <https://doi.org/10.1007/s10291-009-0157-9>.
- [5] M. Bezcioglu, C. Ö. Yigit, ve M. N. Bodur, Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (1), 162–169, 2019, <https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>.
- [6] J. Guo, X. Li, Z. Li, L. Hu, G. Yang, C. Zhao, D. Fairbairn, D. Watson, and M. Ge, Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture, *Precision Agriculture*, 19 (5), 895–911, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>.
- [7] M. R. Kaloop, C. O. Yigit, A. El-Mowafy, A. A. Dindar, M. Bezcioglu, and J. W. Hu, Hybrid wavelet and principal component analyses approach for extracting dynamic motion characteristics from displacement series derived from multipath-affected high-rate GNSS observations, *Remote Sensing*, 12 (1), 2020, <https://doi.org/10.3390/RS12010079>.
- [8] P. Xu, C. Shi, R. Fang, J. Liu, X. Niu, Q. Zhang, and T. Yanagidani, High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: An experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units, *Journal of Geodesy*, 87 (4), 361–372, 2013, <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>.
- [9] F. Zhou, X. Cao, Y. Ge, and W. Li, Assessment of the positioning performance and tropospheric delay retrieval with precise point positioning using products from different analysis centers, *GPS Solutions*, 24 (1), 1–11, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0925-0>.
- [10] X. Ren, X. Zhang, W. Xie, K. Zhang, Y. Yuan, and X. Li, Global Ionospheric Modelling using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS, *Scientific Reports*, 6, August, 1–11, 2016, <https://doi.org/10.1038/srep33499>.
- [11] J. Kouba, A Guide to using international GNSS Service (IGS) Products, Geodetic Survey Division Natural Resources Canada Ottawa, 6 (34), 2009, [Online]. Available: http://graypantherssf.igs.org/igs/scb/resource/pubs/Usin_gIGSProductsVer21.pdf
- [12] Z. Wang, Z. Li, L. Wang, X. Wang, and H. Yuan, Assessment of multiple GNSS real-time SSR products from different analysis centers, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7 (3), 2018, <https://doi.org/10.3390/ijgi7030085>.
- [13] L. Chen, Q. Zhao, Z. Hu, X. Jiang, C. Geng, M. Ge, and C. Shi, GNSS global real-time augmentation positioning: Real-time precise satellite clock estimation, prototype system construction and performance analysis, *Advances in Space Research*, 61 (1), 367–384, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.037>.
- [14] L. Wang, Z. Li, M. Ge, F. Neitzel, Z. Wang, and H. Yuan, Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service, *Remote Sensing*, 10 (2), 2018, <https://doi.org/10.3390/rs10020337>.
- [15] T. Hadas and J. Bosy, IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time, *GPS Solutions*, 19 (1), 93–105, 2015, <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0369-5>.
- [16] M. El-Diasty and M. Elsobeiey, Precise Point Positioning Technique with IGS Real-Time Service (RTS) for Maritime Applications, *Positioning*, 06 (04), 71–80, 2015, <https://doi.org/10.4236/pos.2015.64008>.
- [17] L. Wang, Z. Li, M. Ge, F. Neitzel, X. Wang, and H. Yuan, Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS real-time service, *GPS Solutions*, 23 (3), 1–12, 2019, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0856-9>.
- [18] M. Elsobeiey and S. Al-Harbi, Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service, *GPS Solutions*, 20 (3), 565–571, 2016, <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0467-z>.
- [19] N. Takahashi, Y. Ishihara, H. Ochi, T. Fukuda, J. Tahara, Y. Maeda, M. Kido, Y. Ohta, K. Mutoh, G. Hashimoto, S. Kogure, and Y. Kaneda, New buoy observation system for tsunami and crustal deformation, *Marine Geophysical Research*, 35 (3), 243–253, 2014, <https://doi.org/10.1007/s11001-014-9235-7>.
- [20] X. Li, M. Ge, X. Zhang, Y. Zhang, B. Guo, R. Wang, J. Klotz, and J. Wickert, Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: Application to earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 40 (2), 295–300, 2013, <https://doi.org/10.1002/grl.50138>.
- [21] X. Tang, G. W. Roberts, X. Li, and C. M. Hancock, Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn Suspension Bridge, UK, *Advances in Space Research*, 60 (5), 925–937, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.010>.
- [22] M. Bezcioglu, C. O. Yigit, B. Karadeniz, A. A. Dindar, A. El-Mowafy, and Ö. Avcı, Evaluation of real-time variometric approach and real-time precise point positioning in monitoring dynamic displacement based on high-rate (20 Hz) GPS Observations, *GPS Solutions*, 27 (1), 1–13, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01381-6>.
- [23] B. Bahadur, An improved weighting strategy for tropospheric delay estimation with real-time single-frequency precise positioning, *Earth Science Informatics*, 15 (2), 1267–1284, 2022, <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00814-7>.
- [24] B. Bahadur, Impact of different troposphere models on the real-time multi-GNSS PPP performance, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (3), 756–768, 2022, <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1061668>.
- [25] E. Tunali, Monitoring Water Vapor Variations with PPP and IGS Real Time Service, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (1), 343–356, 2018,

- <https://doi.org/10.5578/fmbd.66259>.
- [26] T. Öcalan ve M. Soycan, RTCM/SSR Mesajları İle Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (PPP-RTK) Tekniği, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4 (2), 30–41, 2012.
- [27] S. Alçay, Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) Yönteminin Konum Belirleme Performansının Doğruluk Ve Hassasiyet Bakımında İncelenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (1), 121–133, 2019, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.516842>.
- [28] S. Alçay and Ö. Atiz, Farklı Yazılımlar Kullanılarak Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) Yönteminin Performansının İncelenmesi, Geomatik, 6 (1), 77–83, 2021, <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>.
- [29] R. M. Alkan, S. Erol, ve B. Mutlu, IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği, Yerbilimleri, 43 (1), 76–95, 2022, <https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1050124>.
- [30] C. İnal, B. Bilgen, S. Bülbül, ve M. Başbük, Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlama etkisi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (1), 109–115, 2021, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.996018>.
- [31] Z. Nie, F. Liu, and Y. Gao, Real-time precise point positioning with a low-cost dual-frequency GNSS device, GPS Solutions, 24 (1), 1–11, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0922-3>.
- [32] D. Janos, P. Kuras, and Ł. Ortyl, Evaluation of low-cost RTK GNSS receiver in motion under demanding conditions, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 201, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111647>.
- [33] M. F. Karabulut, N. O. Aykut, B. Akpınar, G. Oku Topal, Z. B. Çakmak, B. Doran, A. A. Dindar, C. Ö. Yiğit, M. Bezcioglu, and A. Zafer, The Positioning Performance of Low-Cost Gns Receivers in Precise Point Positioning Method, Advances in Geodesy and Geoinformation, 71 (2), e29, 2022, <https://doi.org/10.24425/agg.2022.141916>.
- [34] G. Sanna, T. Pisanu, and S. Garau, Behavior of Low-Cost Receivers in Base-Rover Configuration with Geodetic-Grade Antennas, Sensors, 22 (7), 1–17, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22072779>.
- [35] M. Di, B. Guo, J. Ren, X. Wu, Z. Zhang, Y. Liu, Q. Liu, and A. Zhang, GNSS Real-Time Precise Point Positioning in Arctic Northeast Passage, Journal of Marine Science and Engineering, 10 (10), 2022, <https://doi.org/10.3390/jmse10101345>.
- [36] R. Hohensinn, R. Stauffer, M. F. Glaner, I. D. Herrera Pinzón, E. Vuadens, Y. Rossi, J. Clinton, and M. Rothacher, Low-Cost GNSS and Real-Time PPP: Assessing the Precision of the u-blox ZED-F9P for Kinematic Monitoring Applications, Remote Sensing, 14 (20), 1–25, 2022, <https://doi.org/10.3390/rs14205100>.
- [37] G. Oku Topal, M. F. Karabulut, N. O. Aykut, and B. Akpınar, Performance of low-cost GNSS equipment in monitoring of horizontal displacements, Survey Review, 1–10, 2023, <https://doi.org/10.1080/00396265.2023.2179910>.
- [38] A. El-Mowafy, M. Deo, and N. Kubo, Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections, GPS Solutions, 1–11, 2016, <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0583-4>.
- [39] T. Takasu and A. Yasuda, Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB, International Symposium on GPS/GNSS, 4–6, 2009.
- [40] B. Li, H. Ge, Y. Bu, Y. Zheng, and L. Yuan, Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers, Satellite Navigation, 3 (1), 2022, <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00074-2>.





Güneş enerjisinin İç Anadolu bölgesinde kullanılabilirliği ve sistem analizi

Usability and system analysis of solar energy in the Central Anatolia region

Müjdat Öztürk^{1,*} , Ramazan Kayabaşı² 

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kaman Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

² Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 38900, Kayseri, Türkiye

Öz

Güneş enerjisinden maksimum elektrik üretimi için kurulumların ışınım şiddeti, berraklık indeksi, güneşli gün sayısı ve güneşlenme süresi yüksek illere yapılması oldukça önemlidir. Yapılan bu çalışmada, İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin güneş enerji potansiyeli ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi olarak yararlanma potansiyeli araştırılmıştır. Half-cut PV panel kullanılan sistemin Ankara ve Konya iklim şartlarında TRNSYS programı ile modellenmesi yapılmıştır. Modellemesi yapılan iller ile diğer illerin potansiyelleri ve enerji üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Güneş enerjisinden Ankara ve Konya illerinin yıllık elektrik üretim değerleri sırasıyla 558 ve 584 kW'tır. En yüksek ışınım şiddeti 1660 kWh/m²-yıl, en yüksek güneşlenme süresi 3007 saat/yıl ve 0.54 ile en yüksek berraklık indeksine Karaman sahiptir. Konya'da bütün aylarda Ankara'dan daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan analizlerde Karaman ve Konya yatırım yapılabilirlik düzeyi en yüksek olan şehirlerdir. Karaman güneş enerjisi bakımından en avantajlı il durumunda olmasına rağmen Konya ili en yüksek kurulu güç oranına sahiptir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, Güneş enerji santrali, İç Anadolu Bölgesi Güneş enerji potansiyeli, Berraklık indeksi, PV modelleme

1 Giriş

Enerji ve enerji kaynakları tüm dünyada önemini korumakta ve teknolojinin değişimi ve gelişimiyle birlikte enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle teknolojik olarak gelişmiş olan ülkeler daha fazla enerji altyapısına sahip ve enerji kaynaklarını daha verimli kullanmaktadır. Var olan kaynakların kullanılmaması bu kaynaklara sahip ülkeler için dış tehditlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle enerji kaynakları üzerine araştırmaların desteklenmesi ve enerji kaynaklarını verimli şekilde işletebilecek tesislerin kurulması önem olduğu kadar bağımsızlığında bir göstergesidir.

Elektrik enerjisi tüm enerji türlerine kolaylıkla dönüştürülebilir nihai ürün olduğu için teknolojik altyapının temel kaynağıdır. Bu nedenle elektrik enerjisi üretiminde kullanılan tüm enerji kaynaklarının verimli kullanılması ve işletilmesi son yıllarda araştırmaların odağında yer almaktadır [1]. Günümüzde artan nüfusun enerji ihtiyacı ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak artan enerji taleplerini

Abstract

For maximum electricity generation from solar energy, it is very important that the installations are made in cities with high radiation intensity, clearness index, number of sunny days and sunshine duration. In this study, the solar energy potential of the cities in the Central Anatolia Region and the potential to benefit from solar energy as electrical energy were investigated. The system using half-cut PV panels was modeled with TRNSYS program in Ankara and Konya climate conditions. The potentials and energy production values of the modeled cities and other cities were compared. Annual electricity generation values of Ankara and Konya cities from solar energy are 558 and 584 kW, respectively. Karaman has the highest radiation intensity of 1660 kWh/m²-year, the highest sunshine duration of 3007 hours/year and the highest clearness index of 0.54. Higher results were obtained in Konya than Ankara in all months. In the analyzes made, Karaman and Konya are the cities with the highest investment level. Although Karaman is the most advantageous city in terms of solar energy, Konya has the highest installed power ratio.

Keywords: Renewable energy sources, Solar power plant, Central Anatolia Region Solar energy potential, Clearness index, PV modelling

karşılama için artan fosil yakıtlarının kullanımı birçok çevresel sorunu beraberinde getirmektedir. Küresel ısınma ve iklim değişikliği nedeniyle sadece bölgesel değil tüm insanlık çevre sorunları ile karşı karşıya kalmaktadır. Fosil yakıtlardan kaynaklı oluşan hava kirliliği, sera etkisinin oluşmasına neden olmakta ve zararlı salınımlar nedeniyle asit yağmurları canlı yaşamını olumsuz etkilemektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları yüksek potansiyele sahip olmasına rağmen dünyanın her yerinde enerji üretim süreçlerinde henüz yeterli kurulumla sahip olmaması, fosil kaynakların hakimiyetini sürdürmesini sağlamaktadır. Son yıllarda artan yenilenebilir enerji yatırımları ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi yüksek bir artış sağlamasına rağmen nüfus artışı ve refah artışına bağlı olarak, toplam üretilen enerji içindeki payı istenilen orana yükselmemiştir. Güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretimi son yıllarda yaygın olarak şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız olarak kurulmakta ve PV maliyetlerinin düşmesi ile yaygınlaşmaktadır [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mujdat.ozturk@ahievran.edu.tr (M. Öztürk)

Geliş / Received: 06.06.2023 Kabul / Accepted: 18.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1310627

Güneşlenme süresi, ışınım şiddeti ve berraklık indeksi gibi parametreler PV panellerin enerji üretimini etkilemektedir [3-5]. Güneş enerjisi potansiyeliyle ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Maham ve Akarslan yapmış oldukları çalışmada Mardin ilinin berraklık indeksi değerini tahmin etmek için YSA, NARX ağları ve Ridge regresyon yöntemleri kullanarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [6]. Elibol vd. yapmış oldukları çalışmada üç farklı PV panel tipinin standart test koşullarındaki değerleri ile dış ortamdaki değerleri karşılaştırmıştır. Ayrıca PV panel tipleri, ortam sıcaklığı, panel sıcaklığı ve radyasyon miktarının verimlilik ve performans etkilerini istatistiksel olarak analiz etmişlerdir [7]. Kaynar vd. Amasya ilinin Karadeniz Bölgesinin en fazla güneş alan illerinden biri olması sebebi ile güneş enerjisi potansiyelini araştırmışlardır. Bu bölgede kurulması düşünülen güneş enerjisi sistemlerin daha verimli hale getirilmesi enerji üretimini artırarak ülkemize katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir [8]. Çiftçi ve Altundağ yapmış oldukları çalışmada, Burdur ilinin güneş enerjisi potansiyelini ve elektrik üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda güneş enerji santralleri için uygun bölgeler tespit edilmiş ve kurulacak olan yeni santraller için trafo merkezlerinin kapasitelerinin artırılması gerektiğini ifade etmişlerdir [9]. Kılıç vd. güneş enerjisi potansiyeli olarak iyi bir konumda olan, Diyarbakır ilinin güneşlenme süreleri ve ışınım değerlerini ölçerek ilin enerji üretimi bakımından uygunluğunu araştırmışlar ve yatırım yapılabilirliğinin uygun olduğunu savunmuşlardır [10]. Aksungur vd. güneş enerjisi potansiyelini Türkiye ve Dünya perspektifinden değerlendirmişler ve güneş ışınımı bakımından büyük farklar olmadığını Türkiye'nin tüm bölgelerinde güneş enerjisinin kullanılabilirliğini savunmuşlardır [11]. Ertuğrul ve Kurt Güneydoğu Anadolu Bölgesinin yenilenebilir enerji potansiyelini incelemişlerdir. Bölgede güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması ve çevreye olumsuz etkisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha az olması sebebi ile daha avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir [12]. Öztürk vd. TRNSYS simülasyon programı ile kapsamlı bir PV/T sisteminin enerji, ekserji ve ekonomik analizini yapmışlardır [13]. İşler ve Salihmuhsin yapmış oldukları çalışmada şebekeden bağımsız bir PV sistemini TRNSYS ile modellemişlerdir. TRNSYS sonuçlarının gerçek sonuçlar ile karşılaştırıldığında doğruluk payının yüksek olduğunu ifade etmişlerdir [14].

Yapılan bu çalışmada Türkiye'nin ortasında ve güneş enerjisi potansiyeli bakımında oldukça avantajlı bir konumda olan İç Anadolu Bölgesi'nin güneş enerjisi potansiyeli, kurulu güneş enerji santralleri ve half-cut PV sisteminin TRNSYS ile analizi yapılmıştır. Gerçek hava verileri kullanılarak TRNSYS simülasyon programı ile half-cut monokristal bir PV panel sistemi modellenmiştir. Modellenen bu sistemin bir yıllık enerji üretim değerleri TRNSYS programı ile elde edilerek sonuçlar iller bazında karşılaştırılmıştır. Ayrıca illerin berraklık indeksi değerleri yeni ölçümler ile analiz edilerek illerin güneş enerjisi potansiyellerine göre kurulu güç oranlarının yeterlilikleri ve ticari olarak yatırım yapılması uygun iller belirlenmiştir.

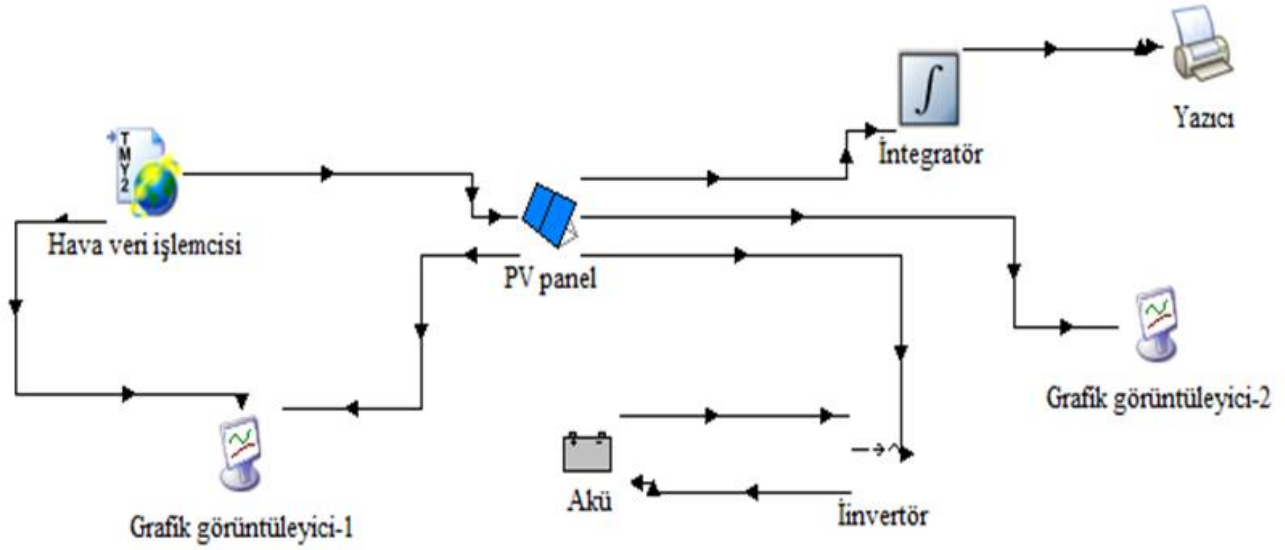
Literatürde iller bazında yapılan çalışmalar bölgenin tamamı hakkında fikir vermektense uzak olmakla birlikte bölgede bulunan tüm iller için ayrıntılı araştırmalar yapılmamış ve berraklık indeksi hesaplanmamıştır. Bu kapsamda iller bazında yapılan çalışmalardan farklı olarak çalışmamız bölge bazında yapılmış ve tüm illerin berraklık indeksi hesaplanmıştır. Ayrıca TRNSYS programı içerisinde bulunan Ankara ve Konya ili için simülasyon programı çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Meteoroloji ve Enerji Bakanlığı verileri ile tek bir çalışmada bölgenin potansiyeli ve simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak literatüre kazandırılmıştır. Bölgenin Türkiye'de bulunan bölgelerin ortalaması üzerinde güneş radyasyonuna sahip olması ve bölgenin coğrafi yapısının uygunluğu güneş enerjisi yatırımlarının yapılmasına fırsat oluşturmada ve çalışmamızın temelini oluşturmaktadır.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada İç Anadolu Bölgesinde bulunan 13 ilin güneş enerji potansiyelleri analiz edilmiştir. Güneş potansiyeli ve sanayi olarak gelişmişlik düzeyleri göz önüne alınarak seçilen Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında 550 W değerinde half-cut PV sistemi TRNSYS programı ile modellenmiştir. İç Anadolu bölgesinde bulunan diğer illerin TRNSYS programında yer almaması nedeni ile modellemede Ankara ve Konya kullanılmıştır. Modellenen half-cut PV sisteminin her iki il için bir yıllık elektrik üretim değerleri TRNSYS simülasyon programı çalıştırılarak elde edilmiştir.

İllerde bulunan kurulu güç ile nüfus ve kurulu güç ile illerin güneş enerjisi potansiyelleri karşılaştırılmıştır. Bölgede bulunan illerin berraklık indeksleri yeni ölçümler ile hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan half-cut güneş panelleri gölgelenme sorununa bir çözüm olarak geliştirilen PV panellerdir. Half-cut PV paneller standart panellere göre çoklu hücreli yapıdadır. Half-cut PV panellerinin öne çıkan özelliği gölge sorununa çözüm bulmaktır. Standart PV panellerde bir sırada tek bir hücre gölgelendiği zaman tüm sıranın elektrik üretimi durmaktadır. Böylece panelden elde edilen elektrik üretimi azalmaktadır. Half-cut paneller bu soruna bir çözüm olarak geliştirilmiştir. Gölgeleme durumunda tüm sıranın elektrik üretimi durmadığı için daha yüksek enerji çıkışı olmakta ve daha az verim kaybı oluşmaktadır [15].

TRNSYS simülasyon programı geniş bir bileşen kütüphanesi ve grafiksel bir ara yüz ile yenilenebilir enerji uygulamaları ve birçok enerji sisteminin analiz edilebildiği ve yaygın olarak akademik çalışmalarda kullanılan bir simülasyon programdır [16]. Şekil 1'de PV sisteminin TRNSYS modeli verilmiştir. Sistem hava veri işlemcisi, PV panel, akü, invertör, integratör, yazıcı ve grafik dönüştürücü bileşenlerinden oluşmaktadır. Sistemde seçilen tüm bileşenler 550W PV panel özellikleri referans alınarak seçilmiştir. PV sisteminin elektrik üretim değerleri Ankara ve Konya için aylık olarak bir yıl boyunca elde edilerek analiz edilmiştir. Günlük elde edilen veriler mevsim koşullarından etkilenmediği için tüm yılın simülasyonu TRNSYS simülasyon programı ile yapılarak yılın dört mevsim koşullarına göre sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 1. Half-cut PV sisteminin TRNSYS modeli

PV panel 550 W gücünde yaklaşık 2.58 m² boyutunda ve %21.28 oranında verime sahiptir. Half-cut PV panelin diğer özellikleri detaylı olarak Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Half-cut PV panel özellikleri

Özellikler	Değerler
Tipi/Hücre Oryantasyonu	Monokristal / 144 hücre
Maksimum Güç (Wp)	550 W
Güç Toleransı	ile +5
Açık Devre Voltajı (Voc)	50.35 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	13.11 A
Yükteki Maksimum Voltaj (Vpm)	41.96 V
Yükteki Maksimum Akım (Imp)	13.83 A
Maksimum Sistem Voltajı	1500 V
Modül Verimi	% 21.28
Boyutlar	(2279x1134x35) mm
Ağırlık / Bağlantı	28 kg / IP68
Sıcaklık Katsayısı Pmax	-0.35/°C
Sıcaklık Katsayısı Voc	-0.28/°C
Sıcaklık Katsayısı Isc	+0.048/°C

Direkt ve yayılı ışınım değerlerinin belirlenmesi berraklık indeksi değerlerine göre hesaplanabilir. İncelenen illerin aylık ortalama berraklık indeksi değerlerini hesaplamak için Denklem (1) kullanılmıştır [13].

$$K_T = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

Burada I (kW/m²-gün) yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışınım şiddetinin aylık ortalama değeri ve I₀ (kW/m²-gün) atmosfer dışından gelen günlük toplam güneş ışınım değeri olup ve Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_0 = \frac{24}{\pi} I_{gs} \cdot f(\cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\omega + \frac{\pi}{180} \cdot \omega \cdot \sin\delta \cdot \sin\phi) \quad (2)$$

Denklemden kullanılan I_{gs} güneş sabiti (I_{gs} = 1.367 kW/m²), φ seçilen şehrin enlemi, f güneş sabitini düzeltme faktörü, δ denklasyon açısı ve ω gün batımı saat açısıdır.

$$f = 1 + 0.0333 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \quad (3)$$

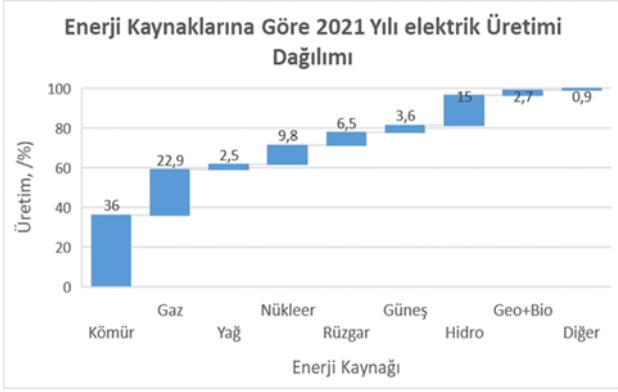
$$\omega = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (4)$$

Burada n, yılın gün sayısıdır.

$$\delta = 23.45^\circ \left[\sin \left(\frac{360 \cdot (n + 284)}{365} \right) \right] \quad (5)$$

2.1 Dünyada enerji üretimi

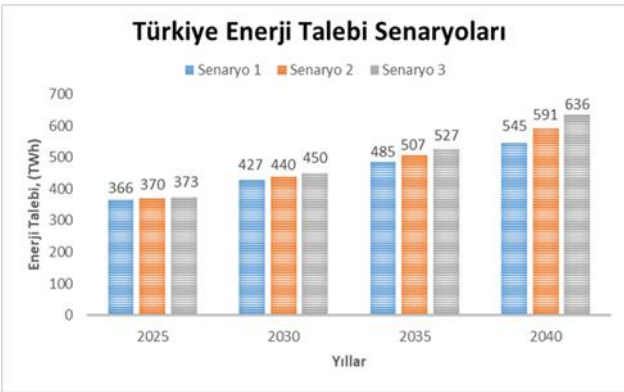
Artan enerji ihtiyacı ve çevresel sorunlara bağlı olarak yenilenebilir güç santrallerinin kurulumları artarak devam etmektedir. Fakat mevcut durum incelendiğinde dünyada fosil kaynaklı yakıtların yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Çevreci olmamalarına rağmen enerji krizleri karşısında fosil yakıtlı güç santralleri aktif hale getirilmektedir. Bu durum artan çevre sorunlarını etkilemesi sonucu olarak küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi tüm dünyayı tehdit eden sorunlara yol açmaktadır. Dünyada Şekil 2’de görülen 2021 yılı elektrik enerjisi üretim verilerine göre; üretilen elektrik enerjisinin %36’sı kömür ve %22.9’u doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilmiş, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim ise %23.9 oranında gerçekleşmiştir [17].



Şekil 2. Dünyada elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre yaklaşık olarak dağılımı [17]

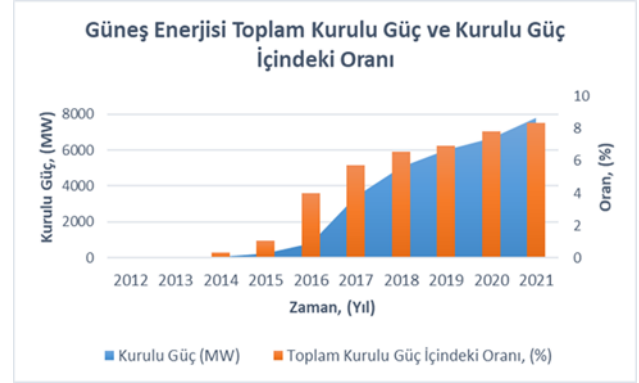
2.2 Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli

Türkiye gelişmeye devam eden ve yıllara bağlı olarak enerji talepleri artan bir ülkedir. Bu nedenle yıllar içerisinde enerji taleplerini karşılamak için önemli araştırmalar yürütülmekle birlikte önemli enerji yatırımları da yapılmaktadır [18]. Şekil 3'te 2025 yılında 366 TWh olarak tahmin edilen elektrik talebi önümüzdeki 15 yıllık dönemde de artış göstermektedir. Tüm senaryolara göre, yıllık ortalama %2.9 ile %3.7 arasındaki artış göstereceği öngörülmektedir. Referans senaryo olan senaryo 2'ye göre beklenen talep artışı %3.4 ve elektrik talebi 591 TWh'tir.



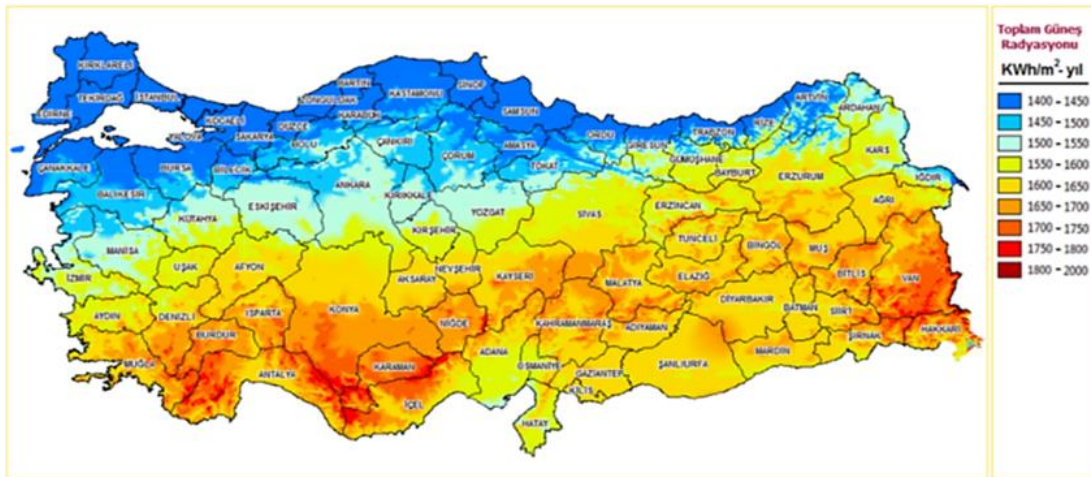
Şekil 3. Türkiye'nin elektrik enerjisi talep senaryosu [19]

Türkiye'de 2012 yılı öncesi güneş enerji yatırımları neredeyse yok denecek kadar az ve küçük ölçekli iken yıllara bağlı olarak artış göstermiş ve ülke genelinde 2021 yılında toplam enerji üretimindeki payı %8'in üzerine çıkmıştır. Son yıllarda toplam elektrik üretimi sürekli artmıştır. Şekil 4'te verilen değerlere göre 2020 yılında toplam kurulu güç 6667 MW iken 2022 yılında %17 artarak 7816 MW olmuştur.



Şekil 4. Türkiye'de güneş enerji santrallerinin kurulu gücü ve kurulu güç içerisindeki oranları [19]

Türkiye'nin coğrafi konumu ve özellikler incelendiğinde güneş enerjisi potansiyeli bakımından birçok ülkeye göre oldukça avantajlı durumdadır [20]. Güneş enerjisi teknolojilerinin giderek artması ve PV panellerinin verimliliklerindeki artış ülkemizde bu alanda yatırımların artmasını sağlamıştır. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunabilirlik, kullanılabilirlik ve ekonomik olması sebebi ile en çok rağbet gören kaynak olma özelliğini taşımaktadır. Ülkemizin sahip olduğu güneş potansiyelinin Şekil 5'te Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlasında iller bazında görülmektedir. Bu potansiyelin daha etkin kullanılabilmesi için kurulu santrallerin ve kurulabilecek santrallerin detaylı analizini yapmak fayda sağlayacaktır. Güneş enerjisi potansiyelinin güneye inildikçe arttığı görülmektedir. Ülkemizin güneş enerjisi global radyasyon değeri 1400-2000 kWh/m²-yıl arasında değişmektedir [21].



Şekil 5. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA) [21]

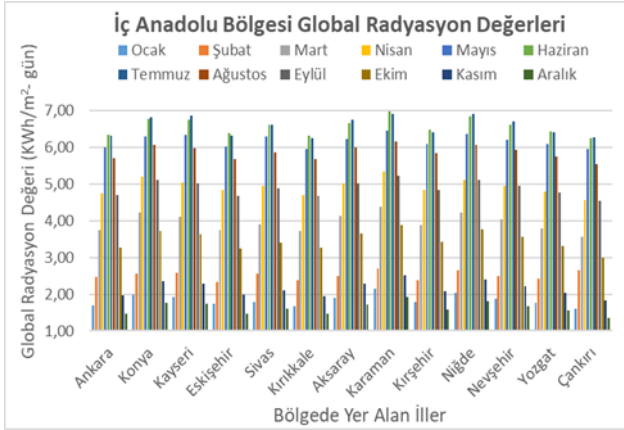
Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli Tablo 2'de görüldüğü üzere Güneydoğu Anadolu Bölgesi en yüksek değere sahipken Karadeniz Bölgesi en düşük değere sahiptir. İç Anadolu Bölgesi bölgeler içerisinde dördüncü sırada yer almaktadır ve bu değer bile Avrupa ortalamasının çok üstünde bir potansiyel demektir.

Tablo 2. Türkiye'nin bölgelerinin ışıma şiddetleri ve güneşlenme süreleri [21]

Türkiye'nin Bölgeleri	İşınım Şiddeti (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süreleri (saat/yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

2.3 İç Anadolu bölgesinin güneş enerjisi potansiyeli

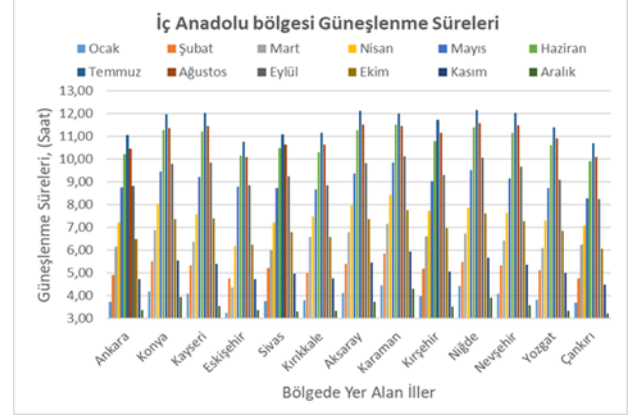
İç Anadolu Bölgesi Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli bakımından dördüncü bölgesidir. Bu potansiyelin son yıllarda yapılan yatırımlar ile değerlendirilmesi, bölgenin kalkınması ve yenilenebilir enerji alanında istihdam sağlaması açısından oldukça önemlidir. Türkiye'nin ortalama global radyasyon değeri Haziran ve Aralık aylarında sırası ile 6.57 ve 1.59 kWh/m²-gün olarak Şekil 6'da verilmiştir. Bu veriler, ülkemizi güneş enerjisi alanında ticari yatırımlar için oldukça cazip hale getirmektedir.



Şekil 6. İç Anadolu global radyasyon değerleri [21]

Bölgede yer alan illerin aylık ortalama günlük güneşlenme süreleri saatlik olarak Şekil 7'de verilmiştir. Ülkemizde güneşlenme süresi maksimum 11.31 saat ile Temmuz ayında ve minimum 3.75 saat ile Aralık ayındadır. Aylık olarak günlük ortalama güneşlenme süresi 7.49 saat/gün ve yıllık ortalama güneşlenme süresi 2736 saat/yıl olarak hesaplanmıştır. Bölgedeki iller açısından güneşlenme süresi değerlendirildiğinde bölgenin güneyinde kalan Kayseri, Aksaray, Niğde, Karaman ve Nevşehir Temmuz

ayında ortalama 12 saatin üzerinde güneşlenme süresine sahiptir. İç Anadolu Bölgesinde ışıma şiddeti en yüksek Karaman 1660 kWh/m²-yıl ve en düşük Çankırı 1432 kWh/m²-yıl değerindedir. Güneşlenme süresi en yüksek Karaman 3007 saat/yıl ve en düşük Eskişehir 2479 saat/yıl değerindedir [21].



Şekil 7. İç Anadolu Bölgesi illeri aylık ortalama güneşlenme süreleri [21]

2.4 Türkiye'nin elektrik üretimi

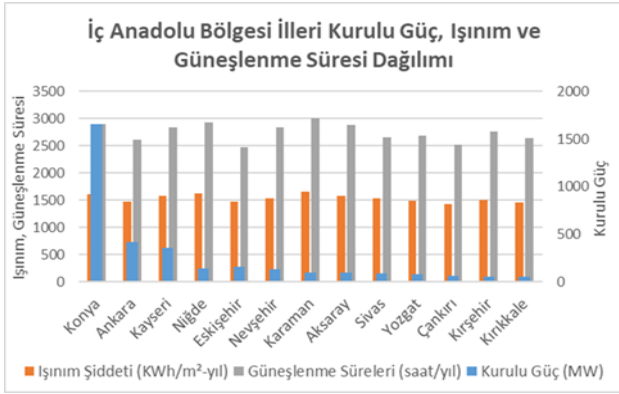
Nüfus artışı ve insanlığın konfor artışı, dünya enerji ihtiyacını sürekli olarak artırmaktadır. Türkiye'nin kalkınmasına bağlı olarak enerji talebi hızlı bir artış göstermektedir. Artan talebi karşılamak için büyük ölçüde fosil yakıt ve son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Son yıllarda Türkiye'nin enerji politikası, ithal yakıt miktarını azaltmak üzerine kuruludur. Bu kapsamda gelecekte rüzgâr ve güneş enerjisi, fosil yakıt miktarını azaltmada önemli bir rol oynayacaktır [22]. 2022 yılında Türkiye'de elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, rüzgâr, hidrolik ve jeotermal enerjiden sırasıyla %4.7, %10.8, %20.6 ve %3.3 olarak elde edilmiştir. Fosil kaynaklar olan kömür ve doğalgazdan sırasıyla %34.6 ve %22.2 olarak elde edilmiştir. %3.7'si ise diğer kaynaklardan elde edilmiştir. 2023 yılı Şubat ayı sonu itibarıyla elektrik üretimi güneş, rüzgâr, hidrolik ve jeotermal, kömür, doğalgaz ve diğer enerji kaynaklarından sırasıyla %9.3, %11, %30.3, %1.6, %20.9, %24.4 ve %2.5 olarak elde edilmiştir [23].

3 Bulgular

Bu çalışmada İç Anadolu Bölgesinde bulunan 13 ilin güneş enerji potansiyelleri ve kurulu güç santralleri incelenmiştir. Güneş enerji potansiyellerinin yüksek olması ve sanayi gelişmişlikleri göz önünde bulundurularak seçilen Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında TRNSYS programı ile 550 W değerinde half-cut PV sistemi modellenmiştir.

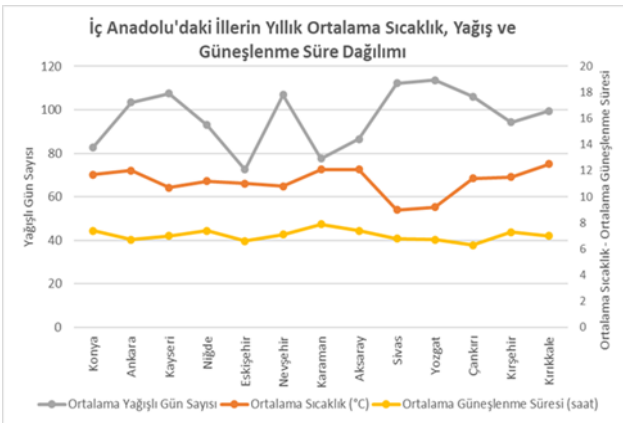
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın enerji istatistikleri incelenerek hazırlanan illere göre ışıma şiddeti, güneşlenme süreleri ve güneş enerji santralleri verileri Şekil 8'de verilmiş olup güneşlenme süresi bölge ortalaması yıllık 2628 saattir. Konya, Kayseri, Niğde, Nevşehir, Karaman, Aksaray ve Kırşehir bu ortalamasının üstünde bir değere sahiptir. Güneşlenme süresi açısından Karaman 3007 saat ile

en yüksek değere sahiptir. Yıllık toplam ışınlım şiddeti değerinin bölge ortalaması 1314 kWh/m²-yıl değerindedir. Konya, Kayseri, Niğde, Nevşehir, Karaman, Aksaray, bu ortalamanın üstünde ışınlım şiddeti değerine sahiptir. Karaman ışınlım şiddeti 1660 kWh/m²-yıl ile en yüksek ışınlıma sahip ildir. İç Anadolu Bölgesinin güneş enerjisi santrallerinin kurulu güç ortalaması 261.77 MW'tır. Konya, Ankara ve Kayseri ortalamanın üstünde kurulu güce sahiptir. Diğer iller ortalaması bölge ortalamasının altında kalmaktadır. En yüksek kurulu güç ile Konya 1652.19 MW güç ile bölge sıralamasında ilk sırada, Kırıkkale 53 MW kurulu güç ile son sırada yer almaktadır.



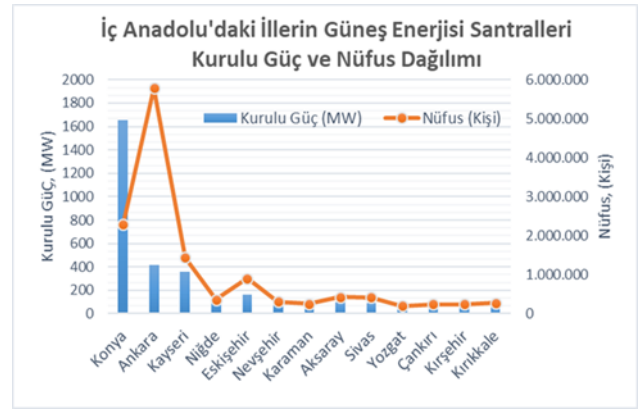
Şekil 8. İllere göre ışınlım şiddeti, güneşlenme süreleri ve güneş enerji santralleri [21]

İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin yıllık ortalama sıcaklık, yağışlı gün sayısı ve güneşlenme süreleri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü istatistiklerinden elde edilerek Şekil 9'da verilmiştir. İllerin yıllık ortalama sıcaklık değeri Konya 11,7 °C, Ankara 12 °C ve Kayseri 10,7 °C'dir. Yıllık yağışlı gün sayısı ortalaması Konya 82,8 gün, Ankara 103,3 gün ve Kayseri 107,4 gündür. İllerin günlük ortalama güneşlenme gün sayısı Konya 7,4 saat, Ankara 6,7 saat ve Kayseri 7 saattir. İllerin ortalama güneşlenme süresi doğrudan PV panel yüzeyine gelen ışınlım süresini etkilemesi nedeniyle önem oluşturmakta ve elektrik üretimini etkilemektedir. Bu nedenle bölgede bulunan tüm illerin verileri grafik haline getirilerek potansiyelleri açıklanmıştır.



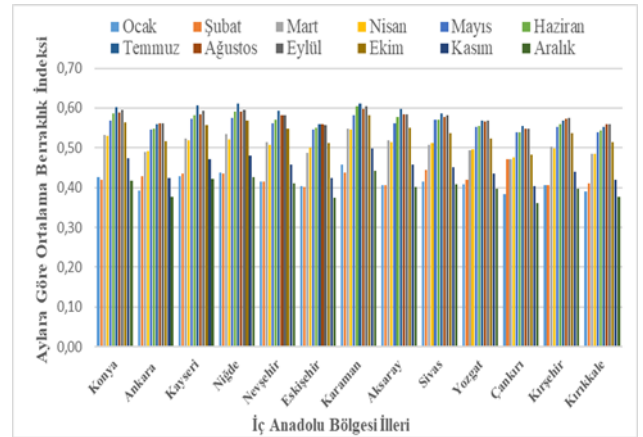
Şekil 9. İllerin yıllık ortalama yağışlı gün sayısı, sıcaklık ve güneşlenme süreleri [24]

İç Anadolu Bölgesinin nüfus oranı en fazla iller sırasıyla Ankara, Konya ve Kayseri'dir. İllerin kurulu güç sıralaması yüksekten düşüğe doğru sırasıyla Konya, Ankara ve Kayseri'dir. Şekil 10'da görüldüğü gibi Konya dışındaki iller kurulu güç dağılımı bakımından nüfus ile paralellik oluşturmaktadır. Nüfus yoğunluğu fazla olan illerde enerji tüketimi arttığı gibi sanayileşme ve kentleşmede artmaktadır. Ayrıca bu iller yüzölçümü olarak bölgede yer alan diğer illere göre daha büyük yüz ölçümüne sahiptir. Konya 40.838 km², Ankara 25.632 km² ve Kayseri 16.970 km²'dir. Sivas 28.164 km² yüz ölçümü büyüklüğü ile bölgede ikinci sırada olmasına rağmen güneş enerjisi kurulu güç sıralamasında 88.06 MW ile 9. sırada yer almakta ve nüfus yoğunluğu sıralamasında 418.442 kişi ile 6. sırada yer almaktadır.



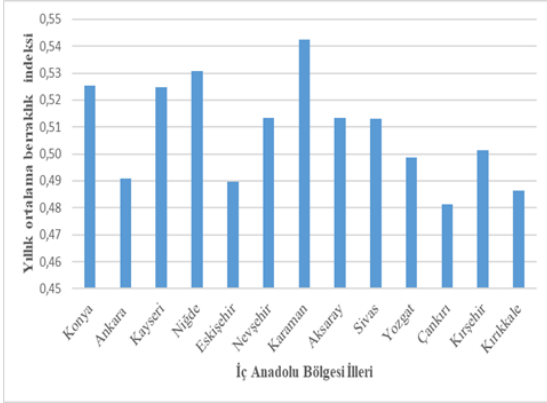
Şekil 10. İç Anadolu Bölgesi illeri kurulu güç ve nüfus dağılımı [21]

Şekil 11'de İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin aylık ortalama berraklık indeksi değerleri verilmiştir. Bölgede bulunan illerin berraklık indeksi değerleri Denklem 1-5 kullanılarak hesaplanmıştır. Berraklık indeksi bütün illerde Mayıs-Ekim ayları arasında güneşlenme süresinin uzun olması, yağışlı gün sayısının az olması, ışınlım şiddetinin yüksek olması gibi etkenlerden dolayı daha yüksek çıkmaktadır.



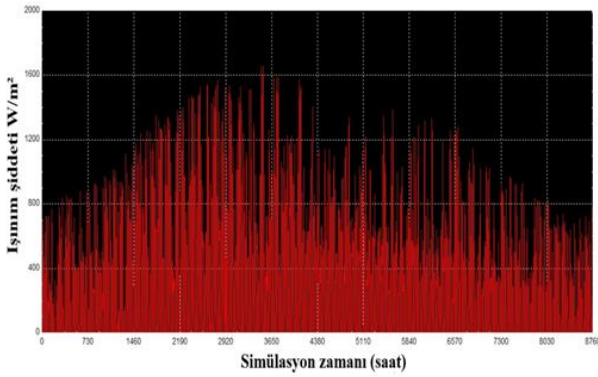
Şekil 11. Aylık ortalama berraklık indeksi

Şekil 12’de İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin yıllık ortalama berraklık indeksi değerleri verilmiştir. Yıllık ortalama en yüksek berraklık indeksi değeri 0.54 ile Karaman ilinde en düşük değer ise 0.48 ile Çankırı ilinde hesaplanmıştır. Güneşlenme süresinin artması PV panelin elektrik üretim periyodunu artırmaktadır. Işınım şiddeti ve berraklık indeksinin yüksek olması PV panellerde enerji üretimini artırmaktadır.

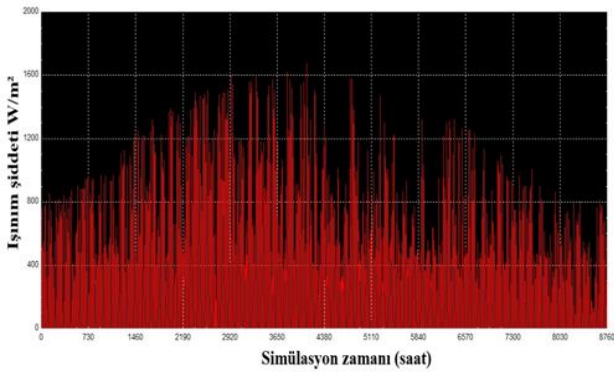


Şekil 12. Yıllık ortalama berraklık indeksi

550 W değerinde half-cut PV panel sistemi gerçek hava verileri kullanarak TRNSYS programı ile modellenmiştir. Modellenen sistemin Ankara ve Konya illeri şartlarında bir yıllık elektrik üretim değerleri elde edilmiştir. Şekil 13 ve Şekil 14’te Ankara ve Konya illerinin bir yıllık TRNSYS programı ile elde edilen ışınım değerleri verilmiştir.

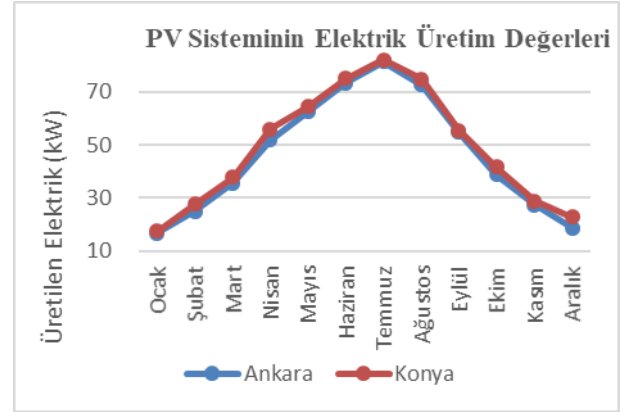


Şekil 13. Ankara ilinin bir yıllık ışınım şiddeti



Şekil 14. Konya ilinin bir yıllık ışınım şiddeti

Şekil 15’te Ankara ve Konya illerinin bir yıllık TRNSYS sonuçlarına göre elektrik üretim değerleri verilmiştir. Yılın bütün aylarında Konya’da Ankara’dan daha yüksek bir elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Yaz ayları uzun güneşlenme süresi ve yüksek ışınım şiddetinden dolayı yüksek üretim gerçekleşmiştir. Ayrıca Konya 0.53 ile 0.54 değerine sahip Karaman ilinden sonra İç Anadolu Bölgesinin berraklık indeksi değeri bakımından en yüksek değere sahip ilidir. Berraklık indeksinin yüksek çıkması ilin elektrik üretim potansiyelini artırmaktadır.



Şekil 15. Ankara ve Konya illerinin TRNSYS modeli ile aylara göre elektrik üretimi

4 Tartışma ve sonuç

Yapılan bu çalışmada, güneş enerji potansiyelleri birbirinden farklı olan İç Anadolu Bölgesi illerinin güneş enerji potansiyelleri ve kurulu güç santralleri incelenmiştir. Güneş potansiyelleri ve sanayi gelişmişlikleri göz önünde bulundurularak seçilen Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında TRNSYS programı ile modellenen 550 W değerinde half-cut PV sistemi modellenerek incelenmiştir. Bölgede bulunan illerin berraklık indeksi değerleri yeni ölçümler ile analiz edilerek güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti değerlerine göre güneş enerji potansiyelleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca illerde bulunan kurulu güç ile nüfus, kurulu güç ile illerin potansiyelleri karşılaştırılmıştır. İllerin aylık ve yıllık berraklık indeksi değerleri Denklem (1-5) kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Hesaplanan berraklık indeksi değerleri bütün illerde Mayıs-Ekim ayları arasında güneşlenme süresinin uzun olması, yağışlı gün sayısının az olması ve ışınım şiddetinin yüksek olması gibi etkenlerden dolayı daha yüksek çıkmıştır. Karaman ili 3007 saat/yıl ile en yüksek güneşlenme süresine sahip iken, Eskişehir 2479 saat/yıl ile en düşük güneşlenme süresine sahiptir. Berraklık indeksi yaz aylarında yüksek kış aylarında düşüktür. Bölgede bulunan illerde en yüksek ve en düşük berraklık indeksi aylara göre Ankara’da 0.561 ve 0.377, Konya’da 0.602 ve 0.416, Kayseri’de 0.607 ve 0.422, Eskişehir’de 0.558 ve 0.375, Sivas’ta 0.586 ve 0.408, Kırıkkale’de 0.559 ve 0.376, Aksaray’da 0.598 ve 0.400, Karaman’da 0.611 ve 0.442 Kırşehir’de 0.574 ve 0.397, Niğde’de 0.612 ve 0.427, Nevşehir’de 0.593 ve 0.409, Yozgat’ta

0.567 ve 0.396 ve Çankırı'da 0.555 ve 0.361 olarak hesaplanmıştır.

- Yıllık ortalama en yüksek berraklık indeksi değeri 0.54 ile Karaman ilinde en düşük 0.48 ile Çankırı ilinde hesaplanmıştır.
- Bölge illerinin ortalama güneş enerji santrali kurulu güç ve kişi başına düşen ortalama güneş enerji santrali kurulu güç değerleri sırası ile 261,774 MW ve 258 W olarak hesaplanmıştır.
- Ortalama kurulu güç en yüksek ve düşük iller sırası ile Konya ve Kırıkkale'dir. Ortalama kişi başına düşen kurulu güç en düşük 0.072 ile Ankara ve en yüksek il 0.72 ile Konya ili olarak hesaplanmıştır.
- Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında TRNSYS ile modellenen PV sisteminin bir yıllık sonuçlarına göre Konya bütün aylarda Ankara'dan daha yüksek elektrik üretimine sahiptir. Sırası ile Ankara ve Konya illerinin yıllık elektrik üretim değerleri 558 ve 584 kW olarak elde edilmiştir. Ankara ve Konya bölge ortalamasının üzerinde berraklık indeksine sahiptir bu durum enerji yatırımlarının yapılması ile paralellik oluşturmaktadır. Bu illerin yüzölçümünün geniş olması ve bölgede nüfus yoğunluğu bakımından ilk iki sırada bulunması bu şehirlerin enerji taleplerinin ve yatırımlarının da yüksek olmasını sağlamaktadır.
- Karaman ve Konya illerinin yüksek berraklık indeksi, ışınım şiddeti ve güneşlenme süresi değerlerinden dolayı yatırım yapılabilirlik düzeyleri oldukça yüksek bulunmuştur. Konya ili İç Anadolu Bölgesinde en yüksek kurulu güç oranına sahiptir.
- Bölge illeri içerisinde en yüksek ışınım şiddeti 1660 kWh/m²-yıl, en yüksek güneşlenme süresi 3007 saat/yıl ve 0.54 ile en yüksek berraklık indeksi değerine sahip olan Karaman bölge ortalamasının altında kurulu güce sahiptir.

Güneş radyasyonu, berraklık indeksi, günlük güneşlenme süresi ve yıllık güneşli gün sayısı yüksek olan iller güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyelinin yüksek olduğu illerdir. Sonuçlara göre güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan Karaman haricinde diğer illerde yatırım oranı bölge ortalamasını yakalamaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretim değerleri yüksek olan illerin ikinci bir ortak özelliği geniş bir yüz ölçümüne ve nüfus yoğunluğuna sahip olmasıdır. Bu durum sanayi gelişmişliğini artırırken enerji yatırımlarına da fırsat oluşturmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] Ç. Aydoğdu, Yenilenebilir enerji sektöründe ve enerji verimliliğinde kamusal destekler ve Türkiye'de yansımaları. Akademik İzdüşüm Dergisi, 6(1), 52-74, 2021.
- [2] G. Duran ve S. Çelikkaya, Batı Akdeniz Bölgesi güneş enerji sistemleri kümelenme düzey analizi. İktisadi

İdari ve Siyasal Araştırmalar Dergisi, 4(9), 171-187, 2019.

- [3] Y. Nakada, H. Takahashi, K. Ichida, T. Minemoto and H. Takakura, Influence of clearness index and airmass on sunlight and outdoor performance of photovoltaic modules. Current Applied Physics, 10(2), 261-264, 2010.
- [4] A. N. Celik, A simplified model based on clearness index for estimating yearly performance of hybrid PV energy systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 10(8), 545-554, 2002. <https://doi.org/10.1002/pip.450>
- [5] B. S. Lai, X. Li, L. L. Lai and M. D. McCulloch, Daily clearness index profile and weather conditions studies for photovoltaic systems. Energy Procedia, 142, 77-82, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.013>
- [6] F. E. Maham ve E. Akarslan, Güneş ışınım tahmini için farklı güneşlenme durumlarından faydalanan hibrit bir yöntem tasarımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(3), 588-596, 2022. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1074290>
- [7] E. Elibol, Ö. T. Özmen, N. Tutkun and O. Köysal, Outdoor performance analysis of different PV panel types. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 651-661, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.051>
- [8] N. K. Kaynar, Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin Amasya ilindeki potansiyeli. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 4(2), 48-54, 2020.
- [9] A. Çıfci ve E. Altundağ, Burdur bölgesi güneş enerjisi potansiyelinin elektrik üretiminde kullanılabilirliği. Mesleki Bilimler Dergisi, 6(2), 111-120, 2017.
- [10] H. Kılıç, B. Gümüş ve M. Yılmaz, Diyarbakır ili için güneş enerjisi verilerinin meteorolojik standartlarda ölçülmesi ve analizi. EMO Bilimsel Dergi, 5(10), 15-19, 2016.
- [11] K. M. Aksungur, M. Kurban ve Ü. B. Filik, Türkiye'nin farklı bölgelerindeki güneş ışınım verilerinin analizi ve değerlendirilmesi, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 1-4, 2011.
- [12] Ö. F. Ertuğrul ve M. B. Kurt, Güneydoğu Anadolu bölgesinin yenilenebilir enerji kaynakları yönünden değerlendirilmesi. V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, sayfa 232-237, Diyarbakır, Türkiye, 2009.
- [13] M. Öztürk, O. Çalışır and G. Genç, Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 145, 1431-1443, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10675-9>
- [14] Y. S. İşler ve M. Salihmuhsin, Şebekeden bağımsız bir PV sistemin TRNSYS ile gerçek zamanlı modellenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(1), 66-76, 2018.
- [15] S. Duman ve M. Alçı, Yarım ve tam fotovoltaik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin

- toplam verimliliğini etkileyen parametrelerinin incelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(3), 592-600, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1073976>
- [16] TRNSYS. 2006. TRNSYS 16, a transient system simulation program. The Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, U.S.A.
- [17] World Final Energy, Statistics Trends and Impacts. <https://www.worldenergydata.org/world-final-energy/>, Accessed 05 April 2023.
- [18] M. B. Ağırkaya, Türkiye ekonomik büyümesinde yenilenebilir enerji: mevcut durum, gelecek beklentileri, istihdam ve yatırım fırsatları. Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 12(3), 2327-2350, 2022. <https://doi.org/10.48146/odusobiad.1103005>
- [19] Anonim, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye elektrik talebi projeksiyon raporu, EIGM, Ankara, Aralık 2021.
- [20] N. Celik and E. Özgür, Review of Turkey's photovoltaic energy status: Legal structure, existing installed power and comparative analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110344>
- [21] T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İstatistikleri. <https://www.enerji.gov.tr/en-S/Pages/Solar>, Accessed 01 March 2023.
- [22] U. K. Das, K. S. Tey, M. Seyedmahmoudian, S. Mekhilef, M. Y. I. Idris, W. Van Deventer and A. Stojcevski, Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 912-928, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.017>
- [23] T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, Accessed 08 April 2023.
- [24] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/>, Accessed 12 April 2023.





Geleneksel ve bitkisel tabanlı kesme sıvılarının insan/çevre sağlığı ve işlenebilirlik bakımından değerlendirilmesi

Evaluation of traditional and vegetable based cutting fluids in terms of human/environmental health and machinability

Erman Aydın^{1,*} 

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Motorlu Araçlar Ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 09200, Söke/Aydın Türkiye

Öz

Bu çalışmada, geleneksel petro-kimya ürünü ve sentetik kesme sıvıları ile bitkisel tabanlı kesme sıvılarının hem iş sağlığı/güvenliği bakımından insan ve çevre sağlığı üzerine etkileri hem de işlenebilirlik üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Kesme sıvıları talaşlı imalatta soğutma, talaş uzaklaştırma, yağlayıcılık, korozyona karşı koruma şeklinde birçok faydaları bakımından önemli bir uygulama durumundadır. Ancak, kesme sıvılarının geri dönüştürülebilirliği, biodönüşümleri, çevre/insan sağlığı üzerine etkileri günümüz iş sağlığı ve güvenliği politikaları kapsamında büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple, bitkisel tabanlı olmak üzere takviyeli, özel katkılı ya da kesme şartlarına göre sadece bitkisel kaynaklı kesme sıvıları kullanımı hem işlenebilirlik hem insan ve çevre sağlığı kriterleri hem de çevreci ve sürdürülebilir imalat hususları doğrultusunda ön plana çıkmaktadır. Çalışma neticesinde, MQL yöntemi ile bitkisel tabanlı kesme sıvılarının kullanımının kesme sıvısı maliyetlerinin azaltılmasında avantaj sağladığı ve petro kimya ürünü ya da sentetik kesme sıvılarına göre hem çevre/insan sağlığı üzerine hem de işlenebilirlik üzerine daha olumlu katkılar verdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kesme sıvısı, Bitkisel tabanlı kesme sıvısı, Yeşil imalat, İş sağlığı ve güvenliği, MQL

1 Giriş

1992 yılında Society Manufacturing Engineers yayıncılık tarafından basılan “Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application” adlı eserde, kesme sıvılarının kullanımları ile ilgili ilk bilimsel çalışmaların 1968 yılında tormalama üzerine yazılmış olan bir kitap olduğu belirtilmiştir [1]. Ancak kesme sıvılarının kullanımı günümüzden 200 yıl öncesine kadar dayanmaktadır [2]. Kesme sıvısı olarak ilk olarak sadece su kullanımı ile kesme bölgesinde soğutma ve talaşların uzaklaştırılması amaçlanmıştır. Ancak su tek başına bir kesme sıvısı olarak kabul edilmemiştir. Özellikle korozyona sebep olması en büyük sorun olarak görülmüştür. Bu süreçte hayvani yağların da kesme sıvısı olarak kullanıldığı bilinmektedir. Hayvani yağlarda (daha çok domuz yağı kullanılmıştır) ise yüksek sıcaklarda yanma ve

Abstract

In this study, the effects of traditional petrochemical and synthetic cutting fluids and plant-based cutting fluids on human and environmental health in terms of occupational health/safety as well as their effects on workability are discussed. Cutting fluids are an important application in machining in terms of many benefits such as cooling, chip removal, lubrication, corrosion protection. However, the recyclability of cutting fluids, their biotransformation and their effects on the environment/human health are of great importance within the scope of today's occupational health and safety policies. For this reason, the use of plant-based, reinforced, special additives or only plant-derived cutting fluids according to cutting conditions comes to the fore in line with both workability, human and environmental health criteria, and environmental and sustainable manufacturing issues. As a result of the study, it was concluded that the use of plant-based cutting fluids with the MQL method provides an advantage in reducing cutting fluid costs and provides more positive contributions to both the environment/human health and machinability compared to petrochemical products or synthetic cutting fluids.

Keywords: Cutting fluid, Vegetable-based cutting fluid, Green manufacturing, Occupational health and safety, MQL

kokuşma, hızlı bozulma gibi problemler ön plana çıkmıştır [2], [3]. Ardından petrolün bulunması ve petrolün işlenerek farklı yağların elde edilmesi ile kesme sıvısı olarak yağların kullanımına geçilmiştir. Günümüz iş sağlığı ve güvenli, çevre sağlığı konuları da önem kazandıkça bitkisel tabanlı kesme sıvılarının kullanımı daha ön plana çıkmıştır [3]. Bu süreç sadece kesme sıvılarının gelişimi şeklinde değil aynı zamanda makine imalat alanında kesici takımların ve makinelerin de ilerlemesi ile eş zamanlı olarak sürmüştür. Kesme sıvıları uygulandığı bölgedeki talaşların uzaklaştırılması, yağlama etkisi yaparak talaş kaldırmayı yani işlenebilirliği kolaylaştırması, takım talaş ara yüzeyinde bir film tabakası oluşturarak takım aşınmasını azaltması ve aynı şekilde iş parçası üzerinde bir film tabakası oluşturarak malzeme yüzey pürüzlülüğünün azalmasında da etkili olmaktadır. Böylece kesme kuvvetlerinin ve titreşimin de

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: erman.aydin@adu.edu.tr (E. Aydın)

Geliş / Received: 08.06.2023 Kabul / Accepted: 27.09.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1311568

azalmasına sebep olarak işleme verimliliğini artırmaktadır [4]. Bu bağlamda kesme sıvılarından beklenen özellikler aşağıda belirtilmiştir. Bu özellikler ilerleyen teknolojik gelişmeler çerçevesinde artabilmektedir [3-7].

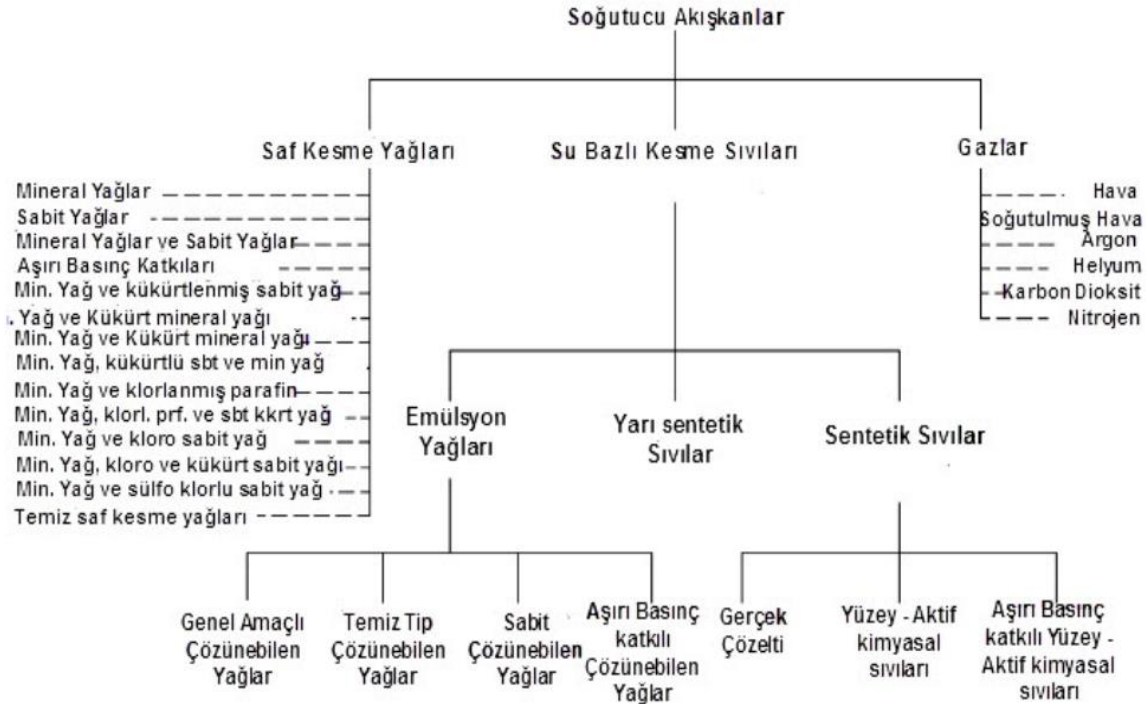
- *Yağlayıcılık
- *Soğutma yeteneği
- *Uzun süre kullanılması
- *Korozyona karşı direnç
- *Makineye zarar vermeme
- *Isı transferinin yüksek olması
- *Buharlaşmama
- *Köpürmeme
- *Ateşleme ve parlamaya karşı dirençli olması
- *Malzemenin metalürjik özelliklerini koruması
- *Çevre ve insan sağlığına zarar vermemesi

Günümüz şartlarında yukarıda belirtilen özellikleri de bünyesinde barındırarak insan ve çevre sağlığına zararsız (en az zararda), sürdürülebilirliği olan, geri dönüşüme uygun kesme sıvılarının kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, petro-kimya ürünü kesme sıvıları, sentetik kesme sıvıları ve bitkisel tabanlı takviyeli/takviyesiz kesme sıvıları hem işlenebilirliğe etkileri hem de çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri kapsamlı olarak incelenmiş ve tavsiyelerde bulunulmuştur. Ayrıca, bu çalışma ile diğer çalışmalar arasındaki temel fark, çalışma öncelikle kesme sıvısı türleri ve iş sağlığı güvenliği ilişkisi üzerine oturtularak planlanmış, tornalama, delme, frezeleme gibi belli başlı imalat yöntemleri üzerinden örneklendirilerek geleneksel ve bitkisel tabanlı kesme sıvılarının insan/çevre sağlığı ve işlenebilirlik bakımından değerlendirilmesi üzerinde

durulmuştur. Ardından, bitkisel tabanlı kesme sıvılarının avantaj ve dezavantajlarından söz edilerek, iş sağlığı ve güvenliği ile sürdürülebilirlik anlayışı içerisinde gelecekteki durumu vurgulanarak okuyucuların yeşil teknolojiler, sürdürülebilir imalat ve biyolojikleştirme kavramları hakkında bilgilendirilmesi amaçlanmıştır.

2 Geleneksel ve bitkisel tabanlı kesme sıvıları

Kesme sıvıları özellikle talaşlı imalat süreçlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Kesme bölgesinde oluşan plastik deformasyon neticesinde açığa çıkan yüksek ısının ve oluşan talaşın uzaklaştırılmasından, takım ömrünü uzatmaya, paslanmayı engellemeye hatta günümüz şartlarında insan ve çevre sağlığına en az zararı vermeye kadar birçok faktörü bünyesinde barındırması gereken bir öneme sahiptirler. Şekil 1'de belirtildiği üzere genel olarak soğutucu akışkanlar olarak adlandırılmakla beraber birçok farklı kesme sıvısı bulunmaktadır [4]. Genel bir bakışla kesme sıvılarının seçiminde takım ömrüne pozitif etki, düşük maliyet, iş parçası yüzey kalitesini iyileştirme, işleme süresinde kısılma gibi katkıların olması beklenmektedir. Belirtilen kesme sıvılarından en çok mineral yağlar ve sentetik yağların kullanılıyor olmasına karşın, çevreci yaklaşımlar ve insan sağlığı üzerine olumsuz etkilerden dolayı mineral yağların yerine bitkisel tabanlı kesme sıvılarının kullanımı zamanla ön plana çıkmaktadır [2]. Genel olarak yağlar üç gruba ayrılmaktadır. Bunlardan mineral yağlar, metal işleme alanında temel kesme sıvısı olarak kullanılmaktadır. Mineral yağlar 10-70 arası karbon atomu içermektedir. Bu zincir uzadıkça yağın viskozite, parlama noktası, yanma ve kaynama noktası değerleri artış göstermektedir [2], [3].



Şekil 1. Soğutucu akışkanlar (kesme sıvıları türleri) [4]

Yağlayıcılar katı, sıvı, gaz ve plastik yağlayıcılar olarak gruplandırılmaktadır. Talaşlı imalatta ise sıvı yağlayıcılar daha çok ön plana çıkmaktadır. Bunlardan ham petrol esaslı olan mineral yağlar, sentetik yağlar ve organik yağlar temel yağlayıcılar durumundadır. Günümüzde daha çok ön plana çıkan organik yağlar, hayvansal ya da bitkisel tabanlı olarak mineral yağlara göre farklılıklar göstermektedir. Uygulama alanı genişliğine bakıldığında tri-gliseridler, esterler ve yağ asitleri en geniş kullanım alanına sahip organik yağlar durumundadır. Tüm bu yağlardan işleme esnasında kesme bölgesine iyi şekilde nüfus ederek, belirtilen bölgede yağlayıcı bir etki göstermesi istenmektedir. Genel olarak yağlayıcı maddenin yüzeye tutunma ya da ıslatma özelliğine “ıslatma kabiliyeti” bir diğer değişle “oiliness” denilmektedir. Organik yağların sahip oldukları ıslatma kabiliyeti mineral yağlardan daha fazla olmaktadır. Bu sebeple, tek başına organik yağ kullanılmadığı, mineral yağ kullanıldığı durumlarda mineral yağ içerisinde %1 ile %10 arasında organik yağ eklemesi yapılabilmektedir. Bunun sonucu olarak, yağın ıslatma özelliği büyük ölçüde artmakta, böylece sürtünme durumu üzerinde pozitif etki oluşturmaktadır. Bir diğer yağ çeşidi olan sentetik yağlar ise ısı ve basınç altında yapay olarak elde edilen yağlardır. İlk olarak II. Dünya Savaşı sırasında geliştirilen sentetik yağlar, 1972 yılında otomobiller için ticarileştirilmiştir. Ardından imalat sektöründe kullanımları da gerçekleşmiştir [8].

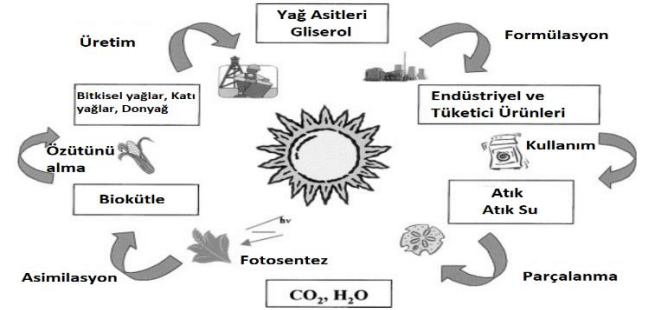
Kesme yağları olarak da adlandırılan kesme sıvıları farklı çalışmalarda farklı gruplara ayrılarak da ifade edilmektedir. Tablo 1’de kesme sıvılarına ait genel bir sınıflandırılma görülmektedir. Bu akışkanlar arasında sentetik akışkanlar ve yarı sentetik akışkanlar yüksek hızlı işleme için en uygun olan kesme sıvıları durumundadır. Aynı ayrı bakılacak olursa sadece yağ olan kesme sıvılarında su karışımı bulunmamaktadır, bunun yerine kükürt, klor veya fosfor gibi farklı katkı malzemeleri eklenerek yağlama, ıslatma ve yapışma gibi özellikleri artırılmaktadır. Saf yağlar yağlama ve paslanmaya karşı iyi özelliklere sahip olmasına karşın dezavantajlar bulunmaktadır. Bu sebeple genellikle düşük hızlı imalat işlemlerinde kullanılmaktadır. Bir diğer çözülebilir yağ olan kesme sıvıları ise farklı emülgatörler ve su ile karıştırılarak hazırlanmakta, imalatta yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Çözülebilir bu yağlar iyi yağlama, ısıyı uzaklaştırma ve paslanmaya karşı koruma şeklinde avantajlar sağlamakta ve hem hafif hem de ağır sanayi koşullarında kullanılabilir. Bu tür yağlarda bakteri üremesi problemi ve buharlaşma ile kesme sıvısında kayıp genel olarak yaşanan sorunları oluşturmaktadır. Bu durumlar hem çalışan sağlığı hem de yağ maliyetleri bakımından problem oluşturmaktadır. Sentetik ve yarı sentetik kesme sıvılarına bakıldığında ise, sentetik kesme sıvıları petrol ürünü ya da mineral yağ içermemektedir. Konsantr olarak bulunan kesme sıvısı kullanımdan önce su ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Sentetik kesme sıvıları mikrobiyal kontrol, bozulma, yanma ve korozyon kontrolü konusunda avantajlar sağlamaktadır. Üstün soğutma kabiliyeti ve takım ile talaş üzerinden hızlı bir şekilde uzaklaşabilmesi, talaş tahliyesini de kolaylaştırmakta ve takım ömrünü uzatıcı etki

yapmaktadır. Son olarak yarı sentetik kesme sıvıları ise çözülebilir yağlar ile sentetik akışkanların karışımından oluşan bir tür hibrit kesme sıvısı türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle %2-%30 arası bir değerinde mineral yağ içermektedirler. Mikrobiyal kontrol, iyi yağlama, iyi soğutma ve korozyon kontrolü avantajları olarak gösterilmektedir. Ancak, su karışımı sebebiyle yağın dengesi bozulabilmekte, buğulanma, köpürme ve alerji gibi durumlara sebep olabilmektedir [9], [10].

Tablo 1. Kesme sıvılarının sınıflandırılması [9]

Kesme Sıvıları	Yağ Tabanlı	Sadece Yağ (%100 Petrol Ürünü)
		Çözülebilir Yağ (%60-%90 Yağ+Emülgatör)
	Kimyasal	Yarı Sentetik (Sentetik ve Çözülebilir Yağ)
		Sentetik (Petrol Ürünü İçermeyen)

Mineral yağlar ile elde edilen kesme sıvıları haricinde bitkisel tabanlı kesme sıvıları da kullanılmaktadır. Bitkisel tabanlı kesme sıvılarında kullanılan soya, mısır, zeytin, susam, pamuk ayçiçeği, kanola, hindistan cevizi vb bitkilerin yağları içerdikleri doymuş ya da doymamış yağ asitlerine ve yetiştirildikleri bölgedeki iklimsel koşullara göre farklı özelliklerde olmaktadır [2], [3]. Bu bitkilerden elde edilen yağlar Şekil 2’de belirtilen döngü ile kesme sıvısı olarak kullanılmakta, ardından endüstriyel atık haline gelerek tekrardan çözünecek toprağa karışmaktadır [2].



Şekil 2. Bitkisel tabanlı kesme sıvılarının geri dönüşüm süreci [2]

Yüksek kesme hızları ve ilerleme değerlerinde ısı oluşumu daha fazla olmaktadır. Bu durumda kesme sıvısının buharlaşması ile gaz oluşmakta ayrıca kesme sıvısının parlama sıcaklığı üzerine çıktığı anda yanma olayı yaşanmaktadır. Bitkisel yağların parlama noktaları mineral yağlar ile karşılaştırıldıklarında yüksektir. Bu özellik viskozite üzerinde de etki göstermektedir. Artan sıcaklık ile viskozite değerinin düştüğü bilinmektedir. Bitkisel yağların sıcaklığa karşı dayanımlarının yüksek olması, viskozitelerini yüksek sıcaklık değerlerinde koruyabilmelerini sağlamaktadır. Böylece yağlayıcılık özelliğini kaybetmeden kullanılabilir [2].

Tablo 2’de mineral ve bitkisel tabanlı kesme sıvılarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2. Bitkisel tabanlı ve geleneksel kesme sıvılarının karşılaştırılması [11]

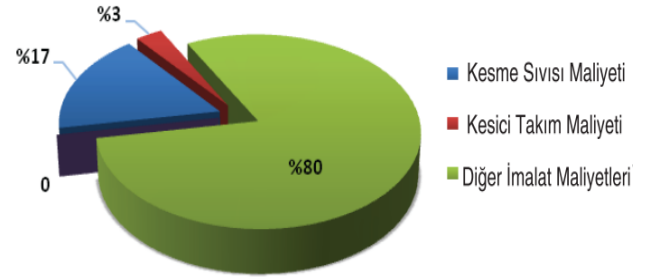
Performans	Kanola Yağı (Bitkisel Yağ)	TMPTO (Poliester)	Doymuş/ Kompleks (Sentetik ester)	PAG (Petrol Türevi)	Mineral Yağ (Petrol)
Bio Çözünürlük	Harika	Çok iyi	İyi-Çok İyi	İyi	Zayıf
Tokisite	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük*	Yüksek
Yağlayıcılık	Harika	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi	İyi
Oksidasyon Direnci	Zayıf	Orta	Çok iyi	İyi	Çok iyi
Termal Kararlılık	Orta	İyi	Çok iyi	İyi	İyi
Hidrolik Kararlılık	Zayıf	Orta	İyi	İyi	Çok iyi
Viskosite İndeksi	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi	Orta
Düşük Sıcaklık	Zayıf	İyi	İyi	İyi	İyi
Uyumluluk	Orta	Orta	Orta	İyi	Çok iyi
Göreceli Maliyet**	2	4	6-8	4	1

*Çözünürlük, bazı PAG'lerin toksisitesini arttırabilir

**Mineral yağ maliyetine kıyasla maliyet (1)

Tablodaki kanola yağı %60 oleic asit içermektedir. TMPTO ile gösterilen trimetilol propan trioleat, PAG ile gösterilen polialkilen glükol kesme sıvılarını ifade etmektedir [11]. Bitkisel tabanlı kesme sıvılarının geleneksel kesme sıvılarına iyi bir alternatif olacağı farklı zamanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda ifade edilmiştir [12], [13].

Ayrıca kesme sıvılarının maliyetleri de üzerinde durulan önemli bir husus durumundadır. Çakır ve diğerlerinin çalışmalarında Autret'e yaptıkları atıf incelendiğinde, talaşlı imalat süreçlerinde kullanılan kesme sıvılarının maliyetlerinin Şekil 3'te belirtildiği gibi toplam maliyet içerisinde %7-%17 arasında gerçekleştiğini ve bu maliyetin ciddi bir gider kalemi olduğunu belirtmişlerdir. Ancak bu maliyetin sadece kesme sıvısının satın alma maliyeti olmadığı, bu maliyet içerisinde kesme sıvısının tedarik, depolama, geri dönüşüm, arıtma gibi birden çok farklı kalemlerin birleşimi ile oluştuğuna dikkat çekmişlerdir [14]. Benzer şekilde Sreejith ve Ngoi kesme sıvısı ve yağlayıcı maliyetlerinin üretim maliyetleri içerisinde %17-%20 arası bir paya sahip olduğunu belirtmişlerdir [15].



Şekil 2. Kesme sıvısı maliyetlerinin toplam maliyet içerisindeki yeri [14]

Maliyet bakımından incelendiğinde farklı kesme sıvısı uygulama prosedürlerinin kıyaslanması Tablo 3'te belirtilmiştir. Belirtilen prosedürlerden MQL prosedürünün diğerlerine kıyasla daha avantajlı bir uygulama yöntemi olduğu görülmektedir [11].

Tablo 3. Farklı prosedürlerde oluşan maliyetlerin niteliksel tahmini [11]

	Hammadde Maliyeti	Sıvı Tüketim Maliyeti	Ekipman Maliyeti	Takım Maliyeti	Temizleme Maliyeti	Bertaraf Maliyeti
Kesme Sıvısı	**	*****	****	***	*****	*****
Kuru İşleme	*	*	*	*****	*	*
MQL	**	**	***	**	**	**
Katı Yağlayıcılar	****	***	***	***	***	****
Kriyojenik Soğutma	***	***	*****	***	*	*
Gaz Soğutma	***	***	****	****	*	*
Sürdürülebilir Kesme Sıvıları	***	****	****	**	****	***
Nanoakışkanlar	*****	****	****	***	****	*****

(*)Çok Düşük; (**)Düşük; (***)Orta; (****)Yüksek; (*****Çok Yüksek

Ekonomiklik ve çevre/insan sağlığı konuları ele alındığında ilk olarak kesme sıvısı kullanımlarını en aza indirecek alternatifler aranmaya başlanmıştır. Bazı çalışmalarda kuru işlemenin önemi ve maliyet açısından avantajları [15] vurgulanmasına karşın, genel olarak kesme sıvısı kullanımını azaltmak amacıyla da içeren sprey uygulama, MQL ya da içten soğutma yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Ancak, broşlama, honlama, dişli çark imalatı gibi durumlarda kesme sıvısının kullanımının kısıtlanamaması şeklinde sorunlarla karşılaşmıştır [16]. Ayrıca doğrudan kesme sıvısı kullanımının azaltmayı hedefleyen yönde çalışmalar da yapılmıştır [17].

3 Kesme sıvılarının insan ve çevre sağlığı üzerine etkileri

Adler ve diğerleri kesme sıvılarının geleneksel amaçlarını özetleyerek bu işlevleri eleştirel bir şekilde incelemek için analitik ve deneysel araştırmaları rapor halinde sunmuşlardır. Çalışmalarında King ve diğerlerinin yaptığı bir araştırmaya göre 2002 yılında Kuzey Amerikalı üreticiler tarafından 2 milyar galonun üzerinde kesme sıvısı kullanıldığı belirtilmiştir [6]. 2015 yılına gelindiğinde küresel çapta 39,4 milyon ton kesme sıvısına ihtiyaç duyulduğu ve 2022 yılında beklentinin 43,9 milyon ton olacağını belirtmişlerdir [11]. Bu miktar gelişen sanayi doğrultusunda her geçen gün artış göstermektedir. Günümüzde endüstrilerdeki çevre kirliliğini azaltmak için çeşitli yeşil teknolojiler tartışılmaktadır. Bu hususta sürdürülebilir üretim kavramı karşımıza çıkmaktadır. Sürdürülebilir üretim, aynı miktarda ürünü daha az girdi ile üretmeyi ve geçiş sırasında ürün israfını azaltmayı amaçlayan bir yaklaşımı ifade etmektedir. Sürdürülebilir bir toplum, çevre dostu teknolojilerin kullanımının insan sağlığını veya gelecek nesillerin yaşam kalitesini tehlikeye atmasını sağlamayı amaçlamaktadır [18]. Günümüz şartlarında üretim süreçlerinin biyolojikleştirilmesi olarak adlandırılan bir kavram oluşmuştur. Bu kavramda üretim süreçlerinde kesme sıvısı kullanımı açısından sadece kesme sıvılarının kullanım miktarlarının azaltılarak çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin minimum seviyeye düşürülemeyeceği, bunun yanında imalat sürecinde kullanılan her türlü içeriğin biyolojik açıdan zararsız olmasının sağlanması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu sebeple özel olarak kesme sıvılarının da biyolojikleştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır [19].

Kesme sıvılarının kullanımı özellikle petro kimya ürünü olması durumunda çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu etkilerin en aza indirilmesi amacıyla endüstriyel düzeyde, temiz üretim kavramı hem süreç düzeyinde (enerji ve hammadde tasarrufu, toksik maddelerin kullanımının azaltılması, atık ve emisyon miktarının sınırlandırılması) hem de ürün düzeyinde (tüm yaşam döngüsü boyunca etkilerin azaltılması ve yeniden kullanımda yenilikçi ilerlemelerin kolaylaştırılması, yeniden üretim ve geri dönüşüm) sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için iyi bilinen bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple çevre ve insan sağlığına zararlı

maddelerin kullanımının en aza indirilmesi mümkünse kullanılmaması sağlanmaya çalışılmaktadır [20].

Geleneksel kesme sıvıları ile çalışan operatörlerin uzun vadede çeşitli cilt ve solunum hastalıklarına yakalanmaları ve meslek hastalıklarının kayıt altına alınmaları ile kimyasal ürünlerin yerine alternatiflerinin kullanılması için çalışmalar ön plana çıkmıştır. Ayrıca petrolün bir kıt kaynak olması sebebiyle mineral yağların sürdürülebilir bir kesme sıvısı olmaması da sürdürülebilirliği bulunan bitkisel tabanlı kesme sıvılarının kullanımını ön plana çıkarmıştır. Bu süreçte hem insan hem de çevreyi en az seviyede etkileyecek olan kesme sıvılarının organik ürünlerden elde edilebileceği görülmüştür. Bitkisel tabanlı kesme sıvılarının geri dönüşüm ve tekrar kullanılabilirlik gibi özellikleri ve biyolojik olarak parçalanabilirliği sayesinde petrol ürünü kesme sıvılarına göre üstünlük sağlamaktadır [2], [21]. Mineral bazlı yağların tamamı petrol ürünü olması sebebiyle, üretilen kesme sıvılarının geri dönüşümleri ve artımlarının maliyetleri de çok yüksek olmaktadır [3]. Her üründe olduğu gibi kesme sıvılarının da belirli çalışma ömürleri bulunmaktadır. Makine başına ayrı tanklarda olduğu gibi işletme içerisinde merkezi kesme sıvısı tankları aracılığıyla da toplanan kesme sıvıları, belirli çalışma süresi sonucunda servis ömrünü tamamlayarak kullanılamaz hale gelmektedir. Kesme sıvılarının servis ömürlerini uzatmak için içlerine özel katkı maddeleri eklenmektedir. Böylece çalışma şartlarında karşılaştıkları yüksek sıcaklıklara, farklı malzemelerde kullanım esnasında içlerine karışan talaşlara, ortam havasındaki değişimlere ve tozlara karşı ömürleri bir miktar artırılabilmektedir. Ancak, genel olarak kesme sıvıları içerisinde su bulunması sebebiyle yüksek sıcaklıklarda suyun buharlaşması, düşük sıcaklıklarda ise katkı malzemelerinin ayrışması gibi sorunlar yaşanabilmektedir. Tüm bu olumsuz faktörler doğrultusunda özellikle suda çözünen kesme sıvılarının ömrünü doldurma aşamasında içlerinde zararlı bakteri oluşumları meydana gelmektedir. Bu zararlı bakteri ve mantarlar hem çevre hem de insan sağlığını olumsuz yönde etkilemekte, makine ve donanımlara zarar vermekte ve kesme sıvısının ömrünün daha erken dolmasına sebep olmaktadır. Bakteriler haricinde kesme sıvısı içerisinde funguslar ve algler de oluşabilmektedir [7], [22]. Şekil 4'te servis ömrünü doldurmuş olan sırasıyla bozulmuş [7] ve çamurlaşmış [23] kesme sıvısı örnekleri görülmektedir.



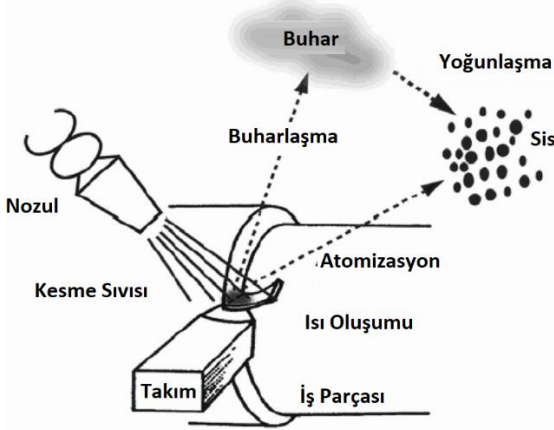
Şekil 3. Servis ömrünü dolmuş kesme sıvıları (a) bozulmuş kesme sıvısı [7] (b) Çamurlaşmış kesme sıvısı [23]

Petrol ürünü kesme sıvıları yüksek ısıdaki işlemlerde yoğun buhar oluşumuna sebep olmakta bu buharın solunması çalışanlar üzerinde solunum sistemi hastalıklarına, çevreye

yayılımı ile de hava kirliliği sorununa sebep olmaktadır [2], [4], [5], [21].

Özellikle son zamanlarda çevre ve insan sağlığı üzerine petro kimya ürünü olan yağlayıcıların olumsuz etkileri olduğu ve uzun süreli kullanımda özellikle cilt kanseri ve bu kesme sıvılarının buharlaşması ile solunması sonucunda ciddi akciğer rahatsızlıklarına sebep olduğu bilinmektedir. Bu nedenle günümüz şartlarında daha çok organik ve çevre-insan sağlığına en az zararda/zararsız olan kesme sıvılarının kullanımı ön plana çıkmaktadır [2], [3], [5]. Günümüz rekabetçi piyasası dikkate alındığında, uluslararası alanda faaliyet gösteren çoğu imalat firmasının üretim yöntemlerini hem ekonomik hem verimli hem de ekolojik farkındalığa dikkat ederek, kısacası ekolojik olarak doğrulanmış üretim yöntemlerine göre belirlemelerini gerekli kılmaktadır [24].

Şekil 5'te belirtilen geleneksel kesme sıvısı kullanımı esnasında kesme bölgesinde oluşan buhar ve sis gösterilmiştir [6]. Mineral bazlı ya da sentetik yağlardan elde edilen kesme sıvılarının kullanımı sonucunda oluşan sis ve buharların solunması sebebiyle çalışanların solunum sistemi hastalıklarına yakalanma olasılıkları artmaktadır. Yapılan çalışmalarda sis şeklinde yağlamada yağ buharının yayılımının ve solunum ile çalışana etkilerinin üzerinde çalışılması gerektiği belirtilmiştir [25].



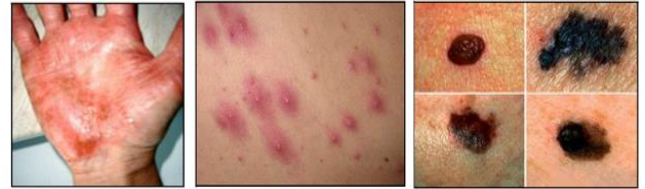
Şekil 4. Kesme sıvısının buharlaşması [6]

Kesme sıvılarının kullanıldığı imalat alanları tornalama [26–28], frezeleme [29], [30], taşlama [2], [18], delik delme [25], [31], [32], raybalama, klavuz çekme, broşlama, kesme işlemleri [33], dişli imalatı, delik işleme vb birçok uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır [5], [26]. Burada yüksek işleme hızlarında yani yüksek kesme hızlarında kesme sıvısının soğutma, yanmaya karşı direnç gibi özellikleri ön plana çıkarken, düşük kesme hızlarında daha çok yağlama özelliği ön plana çıkmaktadır [5]. Tüm bu alanlarda kullanılan kesme sıvılarının cilde uygunluk, korozyonu önleme ve bakteri oluşumunun en az olacağı pH değeri 8,5-9,5 aralığında olmaktadır [5]. Önemli bir özellik de kesme sıvısının su ya da yağ bazlı olup olmaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Su bazlı olan kesme sıvılarında çok miktarda su kullanımı ve bu suyun kirlenmesi hem su kaynaklarının tükenmesi hem de bakteri ve mantarların üremesi için çok

uygun bir alan oluşturması yönünden olumsuz sonuçlar doğurmaktadır [2], [26].

Jibhakate ve diğerleri, mineral yağların kullanımı yerine özellikle bitkisel tabanlı yağların MQL yöntemi ile taşlama işleminde kullanılmasıyla hem enerji tasarrufu hem de kesme sıvısı tasarrufu sağlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca, bitkisel tabanlı kesme sıvısı kullanımında iş parçası üzerinden salınan aerosolün/buharın çalışanların sağlığı üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi olmadığı ve MQL söz konusu olduğunda, ortalama gürültü seviyesinin normal kesme sıvısı uygulamalarınınkine yakın olduğunu sonucuna varmışlardır. Böylece iş sağlığı ve güvenliği bakımından zararlı gaz oluşumu meydana gelmediği ve fiziksel risk faktörlerinden gürültü oluşumu sebebiyle bir mağduriyet yaşanması durumunun da oluşmadığı görülmüştür [18].

Kesme sıvısının sirkülasyon şeklinde sürekli ya da birkaç kez döngüsel olarak kullanımı, kesme sıvısının işlenen malzemeler sebebiyle kirlenmesine, malzemeler ile oluşan yüksek sıcaklıklar sebebiyle de kimyasal tepkimelere girmesi sonucunda kendi kimyasal özelliklerini kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu durum, kesme sıvısının hem işlevsel performansını olumsuz yönde etkilemekte hem de saf kesme sıvısının hem çevre hem de insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkisini daha da arttırmaktadır. Bu durumun neticesinde kesme sıvısında mantar ve bakteriler oluşmaktadır. Bu mantar ve bakteriler kesme sıvısının formunu bozarak kullanılabilirliğini düşürmekte, makinanın aksamalarına zarar vermekte, çalışma alanına sıçramalar sonucunda kirliliğe, deri ile temasta uzun vadede ciddi hastalıklara, buharının solunması ile solunum yolu rahatsızlıklarına sebep olmaktadır [26], [28], [34]. Şekil 6'da kesme sıvıları kaynaklı yaşanan deri hastalıkları gösterilmiştir [4].

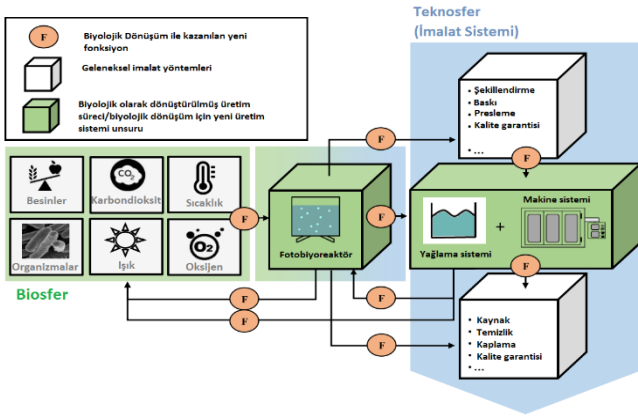


Şekil 5. Kesme sıvıları kaynaklı deri hastalıkları (a) Dermatit (b) Folliculitis (c) Cilt Kanseri [4]

Antonicelli ve diğerleri doğal kaynaklı kesme sıvılarının çevresel etkiyi ve takım aşınmasını azaltmadaki etkinliğini değerlendirmek amacıyla yaptıkları çalışmalarında mineral bazlı kesme sıvıları ile bitkisel tabanlı kesme sıvılarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma da göstermiştir ki, doğal kaynaklı kesme sıvısı kullanımında daha etkili bir yağlama gerçekleştiği böylece daha az (Vb) aşınmanın meydana geldiği, daha az kesme sıvısı kullanımı ile daha yüksek verim neticesinde daha ekolojik olduğunu belirtmişlerdir [35].

Hem ekoloji hem de insan ve çevre sağlığı ön plana alınarak yapılan uygulamalar karşımıza çıkmaktadır. Bu uygulamalardaki süreç yeşil proses olarak adlandırılmaktadır. Yeşil proses parametreleri metodolojisi altında çalışan taşlama prosesinin belirtilen bir örneğine

göre, verimden ödün vermeden enerji tüketiminde %31,54 ve kesme sıvısı miktarında %92,21 azalma sağlanabildiği belirtilmiştir [18]. Yeşil proses sürecinin de bir parçası olarak biodönüşüm kavramı da ön plana çıkmaktadır. Günümüz çalışmalarında özellikle Hagen ve diğerleri, işletme bünyesinde biodönüşüm kavramı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Şekil 7’de teorik bir perspektif ile makine sistemi içerisinde yağlama işlemini gerçekleştirmek amacıyla kurulan biyolojikleştirme birimi görülmektedir. Belirtilen teorik perspektif çevre ve insan sağlığı, sürdürülebilirlik ve biodönüşüm kavramlarının günümüzdeki karşılığını ifade etmektedir [19].

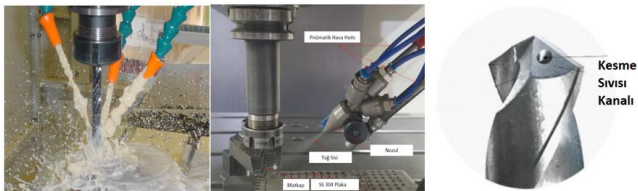


Şekil 6. Kesme sıvısı sisteminin biyolojikleştirilmesi [19]

Özellikle biodönüşüm, yani biyolojik olarak kesme sıvısının parçalanabilirliği çevre sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir. Bitkisel yağlar biyolojik olarak parçalanabilirliğe sahip oldukları [12] için çevreci bir kaynak olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

4 Kesme sıvılarının işlenebilirliğe etkileri

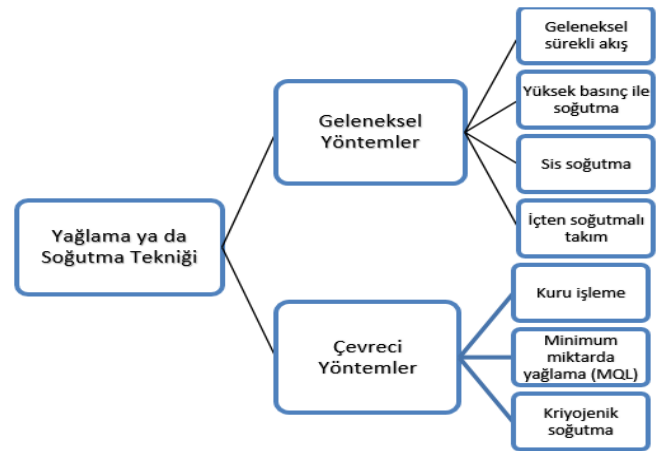
Kesme sıvıları ister bitkisel tabanlı ister sentetik ya da mineral bazlı olsun, imalat sektöründe çok önemli bir yere sahiptir. Kesme sıvıları uygulama şekilleri bakımından sürekli akış, MQL ya da takım içerisinde uygulama gibi farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Şekil 8’de sırasıyla sürekli akış [31], MQL [36] ve içten soğutma [37] olmak üzere üç farklı kesme sıvısı uygulaması gösterilmiştir. Uygulama yöntemleri farklı imalat yöntemlerine göre değişiklik göstererek çeşitlenebilmektedir.



Şekil 7. Farklı kesme sıvısı uygulama türleri (a) sürekli akış [31] (b) MQL [36] (c) İçten soğutma [37]

Belirtilen kesme sıvısı uygulama türleri haricinde, imalat işlemlerinde genel olarak Şekil 9’da belirtildiği üzere geleneksel ve çevreci yöntemler kullanılmaktadır. Ayrıca, bunların yanı sıra literatürde çeşitli araştırmalar da

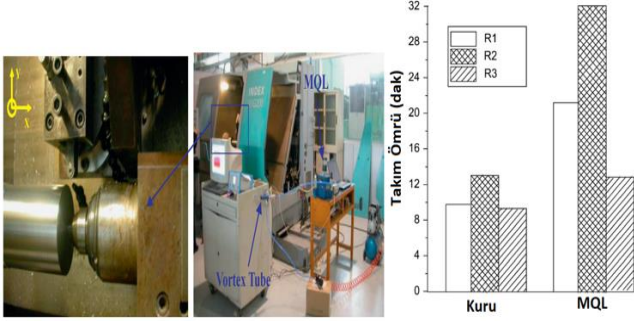
bulunmaktadır [38], [39]. Özellikle MQL yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmalar kuru kesmeye yakın düzeyde işleme olarak adlandırılmaktadır. Kullanılan kesme sıvısı miktarının çok az olması ile maliyetler ve çevre/insan sağlığı üzerinde avantaj sağlarken, kesme sıvısı içerisine karıştırılan nanoparçacıklar ile MQL'nin termal iletkenliğini ve yağlama özellikleri de iyileştirilebilmektedir. Burada önemli olan nokta ise, MQL sisteminde çok az miktarda sıvı veya yağlayıcı kullanımından dolayı kesme sıvısının diğer yöntemlerde kullanılan kesme sıvılarına kıyasla çok daha iyi özelliklere sahip olması gerektiğidir. Nanoakışkanları formüle etmek için hem metalik hem de metalik olmayan nanoparçacıklar kullanılabilir. Uygulamada, talaşlı imalatta grafit, borik asit ve MoS2 gibi yağlayıcılar kullanılmaktadır. Gümüş, SiO2 ve Al2O3 uygulamaları da literatürde bildirilmiştir [34], [40].



Şekil 8. İmalat işlemlerinde kullanılan kesme sıvısı uygulama metotları [34]

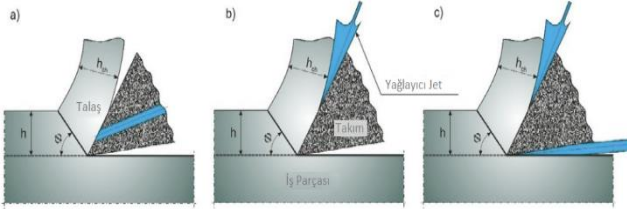
Yapılan çalışmalarda, nanoakışkanın temel sıvısına göre daha iyi tribolojik ve termofiziksel özellikler sergilediğini ve kesme kuvvetlerini, yüzey pürüzlülüğünü, kesme bölgesi sıcaklığını ve takım aşınmasını azalttığını, ayrıca Nanoakışkan bilyeli yatak etkisi, tribo-film oluşumu, tamir etkisi ve cilalama etkisi dâhil olmak üzere aşınma önleme ve sürtünmeyi azaltma özelliklerini de geliştirdiğini belirtmişlerdir [41], [42].

Liu ve diğerleri Ti6Al-4V'nin tornalanmasında kuru kesme ve MQL yöntemini kullanarak, üç farklı takımın (kaplamasız kesici uçlar (R1), farklı kaplama malzemelerine sahip takımlar - nc-ALTiN/a-Si3N4 (R2) ve nc-ALCrN/a-Si3N4 (R3)) takım ömrü davranışlarını belirlemek üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kesme sıvısı uygulamasının MQL yöntemi ile gerçekleştirilmesinin ve ayrıca kesme sıvısı kesici takım kaplama malzemesi uyumunun da işlenebilirliği önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Şekil 10’da belirtildiği üzere MQL yönteminde nc-ALTiN/a-Si3N4 kaplamalı takımın en uzun takım ömrünün elde edildiği anlaşılmaktadır [43].



Şekil 9. Ti6Al-4V'nin tornalanmasında kuru kesme ve MQL yöntemi (a) Deneysel düzenek (b) Takım ömrü [43]

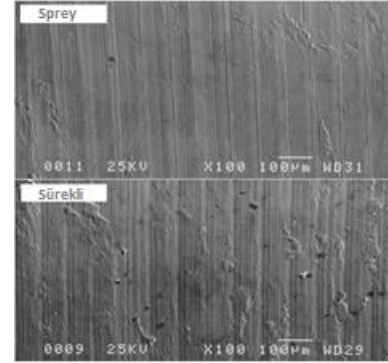
Ayrıca, Şekil 11'de kesme sıvısının farklı uygulama yöntemleri doğrultusunda kesme bölgesine nüfus etme durumları gösterilmiştir [24].



Şekil 10. Kesme sıvısı besleme yöntemleri (a) İçten (b) Talas yüzeyinde (c) Talas yüzeyi ve yan yüzey [24]

Kesme sıvılarının takım iş parçası arasında nüfus edebilmesi işlevselliğini yerine getirebilmeleri açısından son derece önemlidir. Aksi takdirde kesme sıvısı takım ve iş parçası üzerinden akıp gidecek ve gerekli etkiyi oluşturamayacaktır. Bu hususta Saha ve diğerlerinin mikro frezelemede MQL yöntemi üzerine yaptıkları çalışmada takım iş parçası arasında gölge bölge adı verilen ve kesme sıvısının ulaşmadığı bir alanın meydana geldiği ve kesme sıvısının takım iş parçası temas bölgesine erişilebilirlik yönünün de dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Aksi takdirde kesme sıvısının gölge bölgesi tarafından kısıtlanması sebebiyle, kesme kenarlarının eksik yağlanmış durumda dönmeye zorlanacağını ve bu da MQL beslemesinin işlenebilirliği kontrol etme etkinliğini azaltacağına dikkat çekmişlerdir [44]. Buradan da anlaşılacağı üzere kesme sıvısının uygulama şekli ve nüfus etme oranının ne denli önemli olduğu anlaşılabilir. Kesme sıvılarının kullanımları üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Rahman ve diğerleri frezeleme üzerine 35 HRc sertliğinde ASSAB 718 HH paslanmaz çeliği kullanarak, kaplamasız karbür kesici takım ile kuru kesme, sürekli akış ve MQL yöntemi ile gerçekleştirdikleri çalışmada, MQL yöntemi ile kesme sıvısı kullanımı neticesinde kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını daha kabul edilebilir değerlerde elde etmişlerdir. MQL'nin düşük kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği için ekonomik ve çevreye uyumlu bir yağlama tekniği olarak kabul edilebileceğini belirtmişlerdir [30]. Tazehkandi ve diğerleri, Inconel 716'nın tornalanmasında basınçlı hava ile püskürtüldüğünde parçalanabilen bitkisel yağ spray şeklinde kullanmışlardır. Basınçlı hava ile bitkisel yağ

kullanımının Inconel 716'nın tornalanmasında ısı transferini iyileştirdiğini saptamışlardır. Ayrıca, spray şeklinde uygulama ile kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın da sürekli akış uygulamasına göre ciddi oranda iyileştiğini görmüşlerdir. Bu uygulamada normal kesme parametrelerinin de kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Şekil 12'de bitkisel tabanlı kesme sıvısının spray şeklinde ve sürekli uygulanması neticesinde malzeme üzerinde oluşan pürüzlülüğün SEM görüntüsü verilmiştir. Spray şeklinde uygulamada daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edildiği görülebilmektedir [26].



Şekil 12. Kesme sıvısının spray ve sürekli akış uygulaması sonucu Inconel 716 yüzey pürüzlülük SEM görüntüsü [26]

Önemli bir husus da, bitkisel tabanlı kesme sıvılarının basınçlı hava ile spray formunda uygulanması ile kesme sıvısı tüketiminin azaltılması, böylece çevre sorunlarının düşürülmesi, işleme maliyetlerinin azaltılması ve verimliliğin artırılmasının sağlanabilmesidir. Spray şeklinde uygulama kesme sıvısının takım malzeme ara yüzüne çok daha iyi şekilde nüfus etmesini sağlamaktadır. Böylece, kesme sıvısının daha iyi yağlama yaptığı, ayrıca basınçlı havanın da katkısı ile daha iyi bir soğutma sağladığı görülmüştür [26].

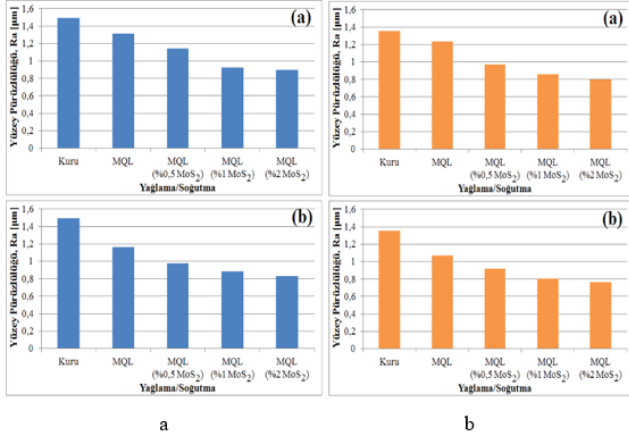
Benzer şekilde Ezugwu ve Bonney Inconel 718'in kaplamalı karbür takımla tornalama işleminde yüksek basınçlı kesme sıvısı kullanarak daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü elde etmişlerdir. Bu durum bitkisel tabanlı kesme sıvılarında da uygun şartlarda kullanıldığında verimliliği artırıcı sonuçlar ortaya koyacağını göstermektedir [27].

Sarıkaya ve Güllü Haynes 25 malzemenin tornalanmasında kaplamasız karbür takım ile bitkisel tabanlı kesme sıvısı kullanmışlardır. Minimum miktarda yağlama (MQL-Minimum quantity lubrication) yöntemi ile 180 mL/h akışkan miktarları ile 6 bar basınç ve 30m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını minimize ettiklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, MQL yönteminin de kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, takım türü gibi değişkenler gibi önemli bir değişken olduğunu ve üzerinde durulması gereken bir etken olduğunu vurgulamışlardır [45].

Uysal AISI 430 ferritik paslanmaz çeliği frezelemede MoS₂ takviyeli bitkisel tabanlı kesme sıvısı kullanarak MQL yöntemi ile WC ve TiN kaplamalı karbür takımlar kullanarak katkı malzemesi oranı ve MQL akış hızının işlenebilirlik üzerine etkilerini araştırmışlardır. MoS₂ nano takviyeli

bitkisel tabanlı kesme sıvısının MQL ile kullanımında AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin yüzey kalitesinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, TiN kaplamalı karbür takımında daha düşük yüzey pürüzlülükleri elde etmişlerdir [29]. Şekil 13'de yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir.

Bu sebepler göz önüne alındığında MQL yönteminin uygun kesme sıvısı ve nanoparçacık kullanımı ile ön plana çıktığı görülmektedir. MQL kullanımının işlenebilirlik üzerine etkilerini içeren derleme çalışmaları da gerçekleştirilmiştir [46], [47].



Şekil 13. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin frezele sonrası yüzey pürüzlülük değerleri a) WC takımla yapılan frezeleme işlemi (a) 20ml/saat (b) 40ml/saat b) TiN kaplamalı takım ile yapılan frezeleme işlemi (a) 20ml/saat (b) 40ml/saat [29]

Costa ve diğerleri TiAlN kaplamalı HSS matkap ile DIN 38MnS6 çeliği 45 m/dk ve 60 m/dk kesme hızlarında kuru kesme, sürekli akış ve MQL yöntemlerinde sırasıyla mineral yağ (sürekli akış ve MQL), yarı sentetik yağ (sürekli akış) ve bitkisel tabanlı yağ (MQL) kullanarak delme işlemine tabi tutmuşlardır. Bitkisel tabanlı kesme sıvısı kullanımı sonucunda mineral bazlı kesme sıvılarına kıyasla daha az çapak yüksekliği oluştuğunu belirtmişlerdir [31].

Kelly ve Cotterell 30mm kalınlığında ACP 5080 dökme alüminyum alaşım malzeme üzerine farklı kesme hızı ve ilerleme değerlerinde 10mm çapında helisel matkap kullanarak yaptıkları araştırmada, çeşitli kesme sıvısı uygulamalarının delinebilirliğe etkilerini incelemişlerdir. Sırasıyla sürekli akış, sprey yağlama, basıncı hava ve kuru kesme şartlarında gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar neticesinde, takım aşınması açısından sprey yağlamanın yüksek kesme hızı ve ilerleme değerlerinde çok daha iyi olduğunu, kuru kesme şartlarında alüminyum malzemenin delinmesinin neredeyse imkânsız olduğu, delme şartlarının işlenebilirliğe imkan vermediğini belirtmişlerdir. Yüksek kesme hızı ve ilerleme değerlerinde ($V_c = 105 \text{ m/dk}$, $V_f = 500 \text{ mm/dk}$) sprey yağlama ile daha düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir [25].

Rahim ve Sasahara Ti-6Al-4V malzemenin yüksek hızda delinmesinde bitkisel tabanlı kesme sıvısı ve sentetik ester kesme sıvısı kullanımının işlenebilirlik üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında palm yağı ve sentetik ester kesme sıvıları ile MQL yöntemini kullanmışlardır. Palm

yağının MQL yöntem ile kullanılması ile kesme kuvveti, sıcaklık, güç ve kesme enerjisi bakımından sentetik ester kesme sıvısına kıyasla daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, palm yağının sentetik ester kesme sıvısına MQL yönteminde kullanmak için alternatif bir kesme sıvısı olabileceğini belirtmişlerdir [32].

Wickramasinghe ve diğerleri yaptıkları çalışmada yeni bir suda çözünür kesme sıvısı formülasyonunun AISI 304 paslanmaz çelik, yumuşak çelik ve dökme demir ile gerçekleştirilen tornalama ve frezeleme deneyleri sırasındaki performanslarını değerlendirmişlerdir. Bitkisel tabanlı olarak hazırladıkları kesme sıvısında baz yağ olarak beyaz hindistancevizi yağı, su ve yüzey aktif maddeler olarak gıda sınıfı katkı maddelerinin kullanıldığı bir kesme sıvısı hazırlamışlardır. Viskozite, pH değeri ve biyözünürlük değerlerini ölçmüşler ve ticari olarak temin edilebilen bitkisel yağ bazlı olmayan bir kesme sıvısı ile karşılaştırmışlardır. İşleme deneyleri boyunca yüzey pürüzlülüğü ve takım yüzey sıcaklığını ölçmüş ve çevre dostu hindistancevizi yağı bazlı kesme sıvısı ile daha iyi performanslar gözlemlemişlerdir. Hindistancevizi yağı bazlı kesme sıvısının takım ömrü, kesme sıcaklıkları, biyolojik olarak parçalanabilirlik açısından üstün performans gösterdiği sonucuna varmışlardır [10].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, genel olarak bilindiği üzere düşük kesme hızlarında yağlama özelliği iyi, yüksek kesme hızlarındaki işlemlerde ise soğutma özelliği iyi olan kesme sıvılarının kullanılması gerekliliğinden dolayı [7] bitkisel tabanlı ya da organik kesme sıvılarının seçimleri de bu şartlara uygun olarak yapılması gerektiği görülmüştür. Aksi taktide doğru seçilmeyen işleme koşulları neticesinde istenen verimlilik elde edilemeyecektir. Erhan ve diğerlerinin [12] yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklık ve nem olan ortamlarda bitkisel tabanlı kesme sıvılarının dayanım konusunda yetersiz olduklarını ifade etmişlerdir. Bu durum neticesinde gerekli soğutma ve yağlama performansı özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiğini belirtmişlerdir.

Demir ve diğerlerinin 2009 yılında yaptıkları bir çalışmada, büyük yüklerin meydana geldiği kesme şartlarında mineral yağların içerisinde organik yağlar eklenerek yüksek dayanım ve düşük kayma direncine sahip bir film tabakasının oluşturulabildiğini ancak organik yağlar olan hayvansal ya da bitkisel yağların maliyetlerinin yüksek olması ve ulaşılabilirliğinin az olması [7] sebebiyle yerlerine mineral yağların tercih edildiğini belirtmelerinin üzerinden 14 yıl geçtiği görülmektedir. Bu süreçte hem teknolojinin hem de bitkisel üretim süreçlerinin geliştiği göz önüne alındığında, en büyük faktör olan maliyet ve ulaşılabilirliğin günümüz şartlarında aşılabileceğini göstermektedir.

Bitkisel tabanlı yağların kullanımı maliyet açısından yüksek görülmektedir. Bu sebeple, sürekli kesme sıvısı akışı şeklinde geleneksel kesme sıvısı kullanımı yerine yüksek basınçlı hava ile kesme sıvısı püskürtülmesi şeklinde kullanım hem yüksek maliyetli olan bitkisel tabanlı yağların oransal olarak çok daha az miktarda kullanılmasını sağlamak hem de takım iş parçası ara yüzüne çok daha iyi nüfus ederek işlevini yerine getirmesini kolaylaştırmaktadır [26].

5 Sonuçlar

Geleneksel ve bitkisel tabanlı kesme sıvılarının insan/çevre sağlığı ve işlenebilirlik bakımından değerlendirilmesi üzerine gerçekleştirilen bu çalışma neticesinde

- Kesme sıvısı kullanımının en azından günümüz teknolojik şartları ve talaşlı imalat süreçleri göz önüne alındığında tam olarak elimine edilemeyeceği ve tüm talaşlı imalat süreçlerinin kuru kesme yöntemiyle gerçekleştirilemeyeceği
- Daha az kesme sıvısı kullanımına olanak sağlayan yöntemlerin (MQL vb.) tercih edilmesinin kesme sıvısı maliyetleri ve çevre/insan sağlığı üzerinde büyük bir avantaj sağlayacağı
- Kesme sıvısı kullanımlarının uygun parametreler çerçevesinde işletme başına tüketim olarak azaltılmasının ilk alınması gereken önlem olduğu
- Sürdürülebilirlik, yeşil üretim ve biodönüşüm kavramlarına daha fazla önem verilmesi gerektiği
- Bitkisel ya da hayvansal tabanlı kesme sıvıları maliyet açısından geleneksel sentetik ve mineral yağlara göre belirli bir oranda yüksek olmasına karşın, uzun vadede insan/çevre sağlığı üzerinde petro kimya türevi ve sentetik yağların daha yıkıcı etkileri göz önüne alındığında (çevre kirliliği, su kirliliği, toprak kirliliği, akciğer kanserleri, cilt kanserleri vb.), bu maliyetin çok daha kabul edilebilir olup, sürdürülebilir tarım politikaları ile makul seviyelere çekilebileceği,
- Bitkisel tabanlı kesme sıvılarının kullanımı için devlet politikalarında bu sıvıların yıllık kullanım miktarları, insan/çevre sağlığı üzerinde kısa ve uzun vadede yarattığı avantajlar ön plana çıkarılarak değerlendirilmesi, yasa ve yönetmelikler getirilmesi gerekliliği,
- Bitkisel tabanlı kesme sıvılarının geliştirilmesi için çalışmaların desteklenmesi, bu şekilde sürdürülebilir, geri dönüşümü mümkün, verimliliği yüksek ve insan/çevre sağlığına en az zararda üretim süreçlerinin gerçekleştirilebileceği,
- Kullanımın öncelikli olarak devlet eli altındaki firmalarda pilot uygulama şeklinde hayata geçirilmesi, ilerleyen süreçte küçük ve orta ölçekli firmaların da bu kesme sıvılarının piyasada daha fazla bulunabilirliği ve maliyetindeki azalmalar doğrultusunda tercih etmelerine imkan sunacağı sonuçlarına varılmıştır. İmalat süreçleri belirtilen sonuçlara uygun olarak düzenlendiği takdirde üretim kalitesi, kesme sıvısı maliyeti, insan/çevre sağlığı gibi birçok açıdan avantajların elde edileceği görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] J. D. Silliman, Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application. Society Manufacturing Engineers, Michigan, 1992.
- [2] K. K. Gajrani and M. R. Sankar, Past and Current Status of Eco-Friendly Vegetable Oil Based Metal Cutting Fluids. Materials Today: Proceedings, 4 (2) 3786–3795, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.275>.
- [3] E. Şık, Bitkisel Tabanlı Yağlardan Metal Kesme Sıvısı Eldesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [4] E. Yücel, M. Günay, M. Ayyıldız, Ö. Erkan, ve F. Kara, Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkileri Ve Sürdürülebilir Kullanımı. 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), sayfa 116-121, Elazığ, Türkiye, 16-18 Mayıs 2011.
- [5] Ş. Şirin ve E. Şirin, Merkezi Soğutma Sisteminde Kullanılan Metal İşleme Sıvılarının İnsan Sağlığına Olumsuz Etkileri. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2 (2), 444–457, 2014.
- [6] D. P. Adler, W. W.-S. Hii, D. J. Michalek and J. W. Sutherland, Examining The Role Of Cutting Fluids In Machining And Efforts To Address Associated Environmental/Health Concerns. Machining Science and Technology, 28 (1), 23–28, 2007. <https://doi.org/10.1080/10910340500534282>.
- [7] H. Demir, H. B. Ulaş ve M. Zeyveli, Talaşlı Üretimde Kullanılan Kesme Sıvılarından İstenilen Özellikler. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), sayfa 13-15, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [8] V. Temiz, Triboloji. chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf, Erişim 8 Ekim 2023.
- [9] Z. Wang, The Correlation between the Penetration Force of Cutting Fluid and Machining Stability. Master Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, ABD, 2010.
- [10] K. C. Wickramasinghe, H. Sasahara, E. A. Rahim, and G. I. P. Perera, Green Metalworking Fluids for sustainable machining applications: A review. Journal of Cleaner Production, 257, 120552, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120552>.
- [11] E. Benedicto, D. Carou, and E. M. Rubio, Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. Procedia Eng, 184, 99–116, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.04.075>.
- [12] S. Z. Erhan, B. K. Sharma and J. M. Perez, Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants. Industrial Crops and Products, 24 (3), 292–299, 2006. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2006.06.008>.
- [13] Y. M. Shashidhara and S. R. Jayaram, Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution, Tribology International, 43 (5–6), 1073–1081, 2010. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2009.12.065>.

- [14] A. Çakır, N. Kavak ve U. Şeker, Sürdürülebilir Üretim İçin Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının Geri Dönüşümü. *Mühendis ve Makina*, 58 (684), 15–30, 2017.
- [15] P. S. Sreejith and B. K. A. Ngoi, Dry machining: Machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, 101 (1–3), 287–291, 2000. [https://doi: 10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](https://doi: 10.1016/S0924-0136(00)00445-3).
- [16] M. Kıyak, Application of Cutting Fluids on Machining. 2. International Conference On Tribology Turkeytrib'18, sayfa 244–249, İstanbul, Türkiye, 18-20 Nisan 2018.
- [17] X. C. Tan, F. Liu, H. J. Cao and H. Zhang, A decision-making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study. *Journal of Materials Processing Technology*, 129 (1–3), 467–470, 2002. [https://doi: 10.1016/S0924-0136\(02\)00614-3](https://doi: 10.1016/S0924-0136(02)00614-3).
- [18] R. A. Jibhakate, N. W. Nirwan and K. S. Rambhad, Enhancing the effectiveness of green technology in manufacturing industry. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4298–4305, 2021. <https://doi: 10.1016/J.MATPR.2021.04.592>.
- [19] J. Hagen, R. Arafat, T. Abraham and C. Herrmann, Function oriented biological transformation of a lubrication process system. *Procedia CIRP*, 110, 26–31, 2022. <https://doi: 10.1016/J.PROCIR.2022.06.007>.
- [20] B. F. Giannetti, F. Agostinho, J. J. C. Eras, Z. Yang and C. M. V. B. Almeida, Cleaner production for achieving the sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122127, 2020. <https://doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122127>.
- [21] O. Duman ve Y. Bozkurt, İş Sağlığı ve Güvenliğinde Metal İşleme Sıvıları. *OHS ACADEMY*, 4 (1), 27–43, 2021.
- [22] Y. Yıldırım, Sürdürülebilir Üretim. *Mühendis ve Makina*, 52 (613), 27–29, 2011.
- [23] Sektörel Atık Kılavuzları Metal Sektörü, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Metal_Sektoru_Kilavuzu.pdf, Erişim 08 Ekim 2023.
- [24] G.M. Krolczyk, R.W. Maruda, J.B. Krolczyk, S. Wojciechowski, M. Mia, P. Nieslony and G. Budzik, Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review. *Journal of Cleaner Production*, 218, 601–615, 2019. <https://doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.017>.
- [25] J. F. Kelly and M. G. Cotterell, Minimal lubrication machining of aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 120 (1–3), 327–334, 2002. [https://doi: 10.1016/S0924-0136\(01\)01126-8](https://doi: 10.1016/S0924-0136(01)01126-8).
- [26] A. H. Tazehkandi, M. Shabgard and F. Pilehvarian, On the feasibility of a reduction in cutting fluid consumption via spray of biodegradable vegetable oil with compressed air in machining Inconel 706. *Journal of Cleaner Production*, 104, 422–435, 2015. <https://doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.039>.
- [27] E. O. Ezugwu and J. Bonney, Finish Machining of Nickel-Base Inconel 718 Alloy with Coated Carbide Tool under Conventional and High-Pressure Coolant Supplies. *Tribology Transactions*, 48 (1), 76–81, 2005. <https://doi: 10.1080/05698190590899958>.
- [28] R. Padmini, P. V. Krishna and G. K. M. Rao, Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel. *Tribology International*, 94, 490–501, 2016. <https://doi: 10.1016/j.triboint.2015.10.006>.
- [29] A. Uysal, Ferritik paslanmaz çeliğin nano MoS₂ parçacık takviyeli kesme sıvısı kullanılarak MQL yöntemi ile frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi. *Dicle üniversitesi mühendislik fakültesi mühendislik dergisi*, 7 (1), 151–158, 2016.
- [30] M. Rahman, A. S. Kumar and M. U. Salam, Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (5), 539–547, 2002. [https://doi: 10.1016/S0890-6955\(01\)00160-2](https://doi: 10.1016/S0890-6955(01)00160-2).
- [31] E. S. Costa, M. B. Da Silva and A. R. Machado, Burr produced on the drilling process as a function of tool wear and lubricant-coolant conditions, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31 (1), 57–63, 2009. <https://doi: 10.1590/S1678-58782009000100009>.
- [32] E. A. Rahim and H. Sasahara, A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology International*, 44, 309–317, 2011. <https://doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2010.10.032>.
- [33] C. Menze, T. Reeber, H. C. Möhring, J. Stegmann and S. Kabelac, Modelling of sawing processes with internal coolant supply. *Manufacturing Letters*, 32, 92–95, 2022. <https://doi: 10.1016/J.MFGLET.2022.04.006>.
- [34] S. Debnath, M. M. Reddy and A. Pramanik, Dry and Near-Dry Machining Techniques for Green Manufacturing. In: Gupta, K. (eds) *Innovations in Manufacturing for Sustainability*. Materials Forming, Machining and Tribology. Springer, Cham, pp. 1-27, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03276-0_1.
- [35] M. Antonicelli, A. Piccininni, A. Cusanno, V. Lacedra and G. Palumbo, Evaluation of the effectiveness of natural origin metalworking fluids in reducing the environmental impact and the tool wear. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135679, 2023. <https://doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135679>.
- [36] P. K. G and S. R. D, Analysis of high speed drilling AISI 304 under MQL condition through a novel tool wear measurement method and surface integrity studies. *Tribology International*, 176, 107871, 2022. <https://doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2022.107871>.
- [37] D. Guo, X. Guo, K. Zhang, Y. Chen, C. Zhou and L. Gai, Improving cutting performance of carbide twist drill combined internal cooling and micro-groove textures in high-speed drilling Ti6Al4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 381–389, 2019. <https://doi: 10.1007/S00170-018-2733-Z/METRICS>.
- [38] V. V. Podgorkov, A. S. Kapustin and V. A. Godlevski, Water steam lubrication during machining. *Tribologia*, 162(6)(11), 890–901, 1998.

- [39] S. Bacak ve Ö. Karabıyık, AISI 4140 Çeliğinin Tornalanmasında Atomize Edilmiş Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Performansı. *Teknik Bilimler Dergisi*, 9 (1), 26–31, 2019.
- [40] M. Amrita, S. A. Shariq, M. Manoj and C. Gopal, Experimental investigation on application of emulsifier oil based nano cutting fluids in metal cutting process. *Procedia Engineering*, 97, 115–124, 2014. <https://doi:10.1016/J.PROENG.2014.12.231>.
- [41] K. A. Sharma, A. K. Tiwari and A. R. Dixit, Improved Machining Performance with Nanoparticle Enriched Cutting Fluids under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Technique: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2, 3545–3551, 2015. <https://doi:10.1016/J.MATPR.2015.07.066>.
- [42] D. X. Peng, Y. Kang, R. M. Hwang, S. S. Shyr and Y. P. Chang, Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin. *Tribology International*, 42 (6), 911–917, 2009. <https://doi:10.1016/J.TRIBOINT.2008.12.015>.
- [43] Z. Liu, Q. An, J. Xu, M. Chen and S. Han, Wear performance of (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) coating and (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions. *Wear*, 305 (1–2), 249–259, 2013. <https://doi:10.1016/J.WEAR.2013.02.001>.
- [44] S. Saha, S. Deb and P. P. Bandyopadhyay, Shadow zone in MQL application and its influence on lubricant deficiency and machinability during micro-milling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 220, 107181, 2022. <https://doi:10.1016/J.IJMECSCI.2022.107181>.
- [45] M. Sarikaya and A. Güllü, Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25. *Journal of Cleaner Production*, 91, 347–357, 2015. <https://doi:10.1016/J.JCLEPRO.2014.12.020>.
- [46] A. Zainol and M. Yazid, Review of Development Towards Minimum Quantity Lubrication and High Speed Machining of Aluminum 7075-T6. *International Conference on Design and Concurrent Engineering*, pp 129–142, Malaysia, 2016.
- [47] R. S. Revuru, N. R. Posinasetti, V. R. Vsn and M. Amrita, Application of cutting fluids in machining of titanium alloys—a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91 (5–8), 2477–2498, 2017. <https://doi:10.1007/s00170-016-9883-7>.





Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi

Use of photogrammetry in the development of digital twins and visualization with augmented reality

Abdurahman Yasin Yiğit^{1,*} , Murat Uysal² 

¹ Mersin Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin, Türkiye

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyon Karahisar, Türkiye

Öz

Dijital ikiz oluşturmada en önemli kavram, objenin gerçekliği ne kadar iyi temsil ettiği ve güncellenebilir olmasıdır. Fotogrametri yöntemi bu noktada fotoğraflardan 3B modeller oluşturma yöntemi olduğu için gerçekliği en iyi temsil eden yöntemlerden biridir. Fotogrametri yöntemiyle bir nesnenin farklı açılardan birden fazla fotoğrafı çekilerek nesnenin 3B modeli oluşturulabilir ve bu modeller daha sonra dijital ikiz oluşturmak için kullanılabilir. Çalışmanın ana odak noktası fotoğraf verilerinden üretilen 3B fotogrametrik verilerin dijital ikiz olarak işlev görmesi için bir temsilin temel gereksinimlerini formüle etmek ve bu temel gereksinimlerin bir prototip dijital ikizde nasıl uygulanabileceğini göstermektir. Bu amaç doğrultusunda farklı boyutlarda ve karmaşık yapıdaki üç adet objenin Context Capture yazılımında fotogrametri yöntemi ve SfM algoritması ile dijital ikizi oluşturulmuştur. Son olarak üretilen dijital ikizin görselleştirilmesi ve kullanıcıya mobil veya WEB ortamında erişiminin kolay bir şekilde artırılmış gerçeklik olarak sunumu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dijital ikiz, Fotogrametri, 3B model, Artırılmış gerçeklik, WEB tabanlı görselleştirme

1 Giriş

Dijital ikiz, gerçek dünyadaki karşılığına benzeyen ve aynı şekilde davranan fiziksel bir varlığın, sürecin, sistemin veya ortamın dinamik bir sanal kopyası; bir ürünün, nesnenin, ortamın, sürecin veya hizmetin sanal bir modelidir [1]. Diğer bir deyişle fiziksel bir şeyin tam karşılığı yani sanal bir ikiz yaratmak anlamına gelmektedir. Kısacası dijital ikizler, fiziksel bir varlığın dijital temsilleridir denilebilmektedir. Bu sanal kopya bir araba, bir makine, bir tren hatta bir jet motoru bile olabilir. Dijital ikiz; bir ürünün, sürecin veya hizmetin sanal bir modelidir [2, 3]. Dijital ikiz, verileri alır ve süreçleri çoğaltır. Dijital ikiz ile gerçek dünya ürününün karşılaşılabileceği olası performans sonuçları ve sorunlar tahmin edilebilmektedir [4]. Dijital ikizler temsil ettikleri gerçek dünyadaki varlığın gerçek zamanlı durumunu yansıtmak için sürekli olarak güncellenmelidir. Bu yüzden bir dijital ikiz oluşturma en önemli parçası,

Abstract

The most important concept in digital twin creation is how well the object represents reality and how updatable it is. At this point, photogrammetry is one of the methods that best represent reality as it is a method of creating 3D models from images. With photogrammetry, multiple images of an object can be taken from different angles to create a 3D model of the object, which can then be used to create a digital twin. The focus of this paper is to formulate the basic requirements for a representation of 3D photogrammetric data generated from image data to function as a digital twin and to show how these basic requirements can be implemented in a prototype digital twin. For these purpose, digital twins of three objects of different sizes and complex structures were created by photogrammetry method and SfM algorithm in Context Capture software. Finally, the digital twin was visualized and presented to the user as augmented reality in an easy-to-access mobile or WEB based.

Keywords: Digital twin, Photogrammetry, 3D model, Augmented reality, WEB-based visualization

dijital ikizi oluşturacak hedef nesnenin gerçekliğinin sanal ortamda görsel olarak ne kadar iyi temsil edildiğidir [5].

Dijital ikizlerin gücü, gerçek dünya varlıklarını sanal bir ortamda gerçek verilerle doğru ve hassas bir şekilde bağdaştırmaktan gelmektedir. Dijital ikizler, işlevler arası ekiplerin karmaşık sistemleri etkileşimli ve sürükleyici yollarla iş birliği içinde tasarlamasını, oluşturmalarını, test etmesini, dağıtmasını ve çalıştırmasını sağlamaktadır [6]. Dijital ikizler, üreticilerin ve kullanıcıların geçmişini anlamalarına, mevcut koşulları görmelerine ve gelecekteki sorunları önlemelerine yardımcı olurlar. Gerçeği tam anlamıyla temsil eden bir üç boyutlu (3B) dijital ikiz model ve görselleştirmeler yardımıyla simülasyon ile tahmin yoluyla karar verme analiz sürecine önemli avantajlar sağlamaktadır [7]. Bu yüzden dijital ikizler, bir projenin tüm yaşam döngüsü boyunca erişilebilen ve varlıkların mevcut, geçmiş ve hatta gelecekteki durumlarını temsil etmek için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: abdurahmanyasinyigit@gmail.com (A.Y. Yiğit)
Geliş / Recieved: 11.06.2023 Kabul / Accepted: 14.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1313019

kullanılabilen tek bir görünüm sağlayabilmektedir. İyi bir dijital ikiz oluşturmak için aşağıdaki dört maddeyi temel almak önemlidir.

- Dijital ikizler, gerçek dünyadaki bir varlığın tam ve eksiksiz dijital temsili olmalıdır,
- Dijital ikizler, değerli içgörüler elde etmek ve fiziksel varlığı tam olarak anlamak için kullanılabilir olmalıdır;
- Tam ve eksiksiz veriye sahip dijital ikiz süreci beslemek için çeşitli veri kümeleri sağlanabilmelidir;
- Dijital ikiz ekosistemindeki anlayışı derinleştirmek için sürükleyici bir araç olarak ortaya çıkan Artırılmış gerçeklik (AG) ve sanal gerçeklik (SG) gibi araçlarla geliştirilmelidir [8].

Dijital ikizler, kurumsal ve nesnelerin interneti (Internet of Things) verileriyle birlikte görselleştirmek ve analiz etmek için kavramsal modeller (BIM, CAD veya GIS aracılığıyla) içe aktarılabilir veya gerçek dünyadaki fiziksel varlıkları tarayarak oluşturulur [9]. İnsan algısından daha hızlı etkileşimli içerik üreten bir bilgisayar grafik teknolojisi olan gerçek zamanlı 3B tarafından desteklenen bir dijital ikiz, birden fazla veri kaynağını (hem bilgi hem de modeller) gerçeğe yakın, etkileşimli görselleştirmeler olarak düzenleyebilir ve sunabilir [10]. Dijital ikizler, varlıkların fiziksel dünyada yaşayabileceği hareketlerin, kuvvetlerin ve etkileşimlerin sanal temsilleridir. Bu, kullanıcıların üç boyutlu ve eylemlerine gerçek zamanlı olarak yanıt veren dinamik içerikle etkileşim kurmasını sağlar [11]. Bu durumda sanal ortamda, gerçek dünya koşullarını, olasılık senaryolarını ve akla gelebilecek her türlü durumu etkin bir şekilde simüle edebilir ve sonuçları mobil cihazlar, bilgisayarlar ve artırılmış, karma ve sanal gerçeklik dahil olmak üzere herhangi bir platformda anında görselleştirebilirler.

Bir dijital modeli/ikizi tam ve eksiksiz temsil etmek için en önemli veri, hedef objeye ait en güncel halinin temsidir. Günümüzde zaman ve maliyet açısından fotogrametri yöntemi ile 2B fotoğraflardan üretilen nokta bulutu ve fotogerçekçi 3B modeller dijital ikiz oluşturmada kullanılabilir en etkin yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [8, 9]. Fotogrametri ile fotoğraflardan 3B modeller oluşturulabilirdiği için fotogerçekçi dijital ikizlerin geliştirilmesinde giderek daha popüler hale gelmektedir [12]. Dijital ikizler, tasarım ve simülasyon, denetim ve eğitim dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılabilen fiziksel nesnelerin veya sistemlerin sanal temsili olduğu için kullanıcılar; fotogrametriyi artırılmış gerçeklikle entegre ederek dijital ikizleri daha sürükleyici ve etkileşimli bir şekilde deneyimleyerek nesnelerin boyutunu, ölçeğini ve uzamsal ilişkilerini daha iyi anlamalarına yardımcı olabilirler [13]. Fotogrametri yönteminden elde edilen nokta bulutlarından oluşturulan fotogerçekçi 3B modeller ile dijital temsil tam anlamıyla gerçekleştirilebilir [14]. Nokta bulutu veri seti, binlerce noktadan oluşan bir çalışma alanının veya nesnenin dijital bir temsidir ve bu verilerin her biri geometrik bir koordinattır [15]. Bu tek konumsal ölçümler kütesi bir araya gelerek 3B uzayda gerçekliği tam temsil eden ve gerçeğe bürünmüş bir model oluşturur [16, 17]. Bir nokta bulutundan oluşturulan fotogerçekçi 3B modellerden

bir nesnenin derinliği, yüksekliği, geometrisi ve uzaydaki konumu hakkında gözlemler (ve ölçümler) yapılabilmektedir [18]. Elde edilen bu nokta bulutu verileri ile 3B ağlar oluşturulur ve bu ağ dokuları sayesinde nokta bulutundaki noktalar arasında küçük üçgenler oluşturularak daha sonra her noktanın orijinal fotoğrafının küçük bir bölümünü çıkararak binlerce üçgenin her biri için bir doku oluşturulmaktadır [19, 20]. Bu katı dokuya daha sonra gerçekliği tam ve eksiksiz temsil eden bir 3B ağ veya fotogerçekçi doku kaplanarak tam ve eksiksiz bir dijital ikiz model oluşturulur [21, 22]. Oluşturulan bu dijital ikizler, kullanıcıların bir WEB tarayıcısında, bir tablette veya mobil cihazda artırılmış gerçeklik ile görselleştirmesine ve ayrıca durumu kontrol etmesine, analiz yapmasına ve tahmin ve optimizasyon için öngörüler oluşturmasına olanak tanır [23].

Mohammadi vd. (2021), çalışmalarında hem İHA tabanlı fotogrametri hem de yersel lazer tarama yöntemi ile Avustralya'da bulunan bir tarihi köprünün dijital ikizini oluşturmuşlardır. Çalışmada iki yöntem ile üretilen nokta bulutları tabanlı dijital bir ikiz oluşturulmuştur. Bu vaka çalışmasının karşılaştırmalı sonuçları, bu iki büyük hacimli nokta bulutunun bir tarihi köprünün tam bir dijital ikizi değerlendirilmesinde yalnızca önerilen metodoloji ve yaklaşımların yeterliliğini kanıtlamakla kalmadı üretilen dijital ikizlerle denetimlerin yapılabileceği de vurgulanmıştır [24]. Kong ve Hucks (2023), fotogrametri teknolojilerini ve nokta bulutu işleme algoritmalarını dijital bir ikiz çerçeveye entegre ederek tarihi yapılar için yeni bir izleme girişimi sunmuşlardır. Bunu mümkün kılmak için, fiziksel yapının farklı denetim zamanlarındaki sanal modelleri ilk olarak fotogrametri ile üretmişler ardından, farklı zamanlarda üretilen sanal modelleri birbirine hizalayarak yapısal bozulmanın neden olduğu değişiklikleri daha da ayırt etmek için bir izleme yöntemi önermişlerdir. Sonuç olarak fotogrametri yöntemi ile üretilen modellerin bu noktada oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir [25]. Themistocleous vd. (2022), çalışmalarında kültürel mirasta, mekânın gerçek yaşam deneyimini doğru ve ayrıntılı bir sanal temsil yoluyla aktarmak için dijital ikiz modeller ürettiklerini bahsetmişlerdir. Ayrıca gerçeğe bir sanal ortamın kullanılması, insanların sanal ortamları gerçek dünyayla aynı şekilde algıladığı ve bunlara tepki verdiği teorisine bağlı olduğu aktarılmıştır. Bu iki temel nedenden dolayı çalışmada, Structure for Motion fotogrametrisi kullanılarak bir dijital ikiz modeli oluşturulmuş ve lazer tarama kullanılarak oluşturulan bir modelle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda üretilen dijital ikiz modellerin kültürel mirasta kullanımının, kullanıcıya ek anlamsal ve geometrik bilgiler sağlayarak mekânda 4. bir boyut sağladığını ve bunların farklı sanal ortamlarda görsel olarak sunulmasının önemli avantajlar sağladığından bahsedilmiştir [26].

Artırılmış gerçeklik, dijital ikizlerin görüntülenme ve erişilme şeklini değiştirme yeteneğine sahip olduğu için, dijital ikizleri sanal alana aktarılmasıyla modeli yapılan varlıkların kapsamlı bir görünümü sağlanabilmektedir [27, 28]. Üretilen dijital ikiz, tabletler veya akıllı telefonlar gibi mobil cihazlar aracılığıyla AG kullanılarak başka bir ortama yerleştirilerek daha iyi bir görselleştirme düzeyine izin verilebilir veya fiziki nesnenin gerçek konumu dışında dünya

üzerine aktarılabılır [29-31]. Artırılmış gerçeklik ve dijital ikiz entegrasyonunun kullanılması ile birçok çalışmada bilinçli kararlar alınmasına katkı sağlanabilmektedir. Cruz Franco vd. (2022), çalışmalarında mimari mirasın benzersiz yapılarına ait sanal ikizlerin kullanımına yönelik uygulamalı bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu ikizlerin, kültürel varlıkların korunmasını ve yayılmasını garanti edecek ve veritabanları, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik veya oyunlaştırma gibi yeni teknolojiler yoluyla evrensel erişilebilirliği teşvik edeceğinden bahsetmişlerdir. Bu evrensel erişilebilirlik, fiziksel engelleri aşmamıza ve ekonomik veya fiziksel durumları ya da konumları ne olursa olsun herhangi bir kullanıcıya ulaşmamıza olanak tanıyan deneyimler sunmak için yeni bir sanal evren olduğu vurgulanmıştır. Bu iş akışını elde etmek için fotogrametri ile elde edilen dijital ikizler kullanılmış olup mimarinin temsili ve yayılması için yeni sistemler olarak anlaşılan farklı veritabanları çalışılmıştır. Çalışma sonunda sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik ortamlarında kullanılması bir dizi önermeyi karşılayan etkili bir iş akışına entegre edilmek üzere sanal sistemlerin yerinde denetime göre oldukça başarılı olduğu vurgulanmıştır [32]. Sonuç olarak gerçek dünyanın tam ve eksiksiz bir modeli; doğru, hızlı bir veri toplama süreci ile bunun temsili olan dijital ikiz kavramından geçmektedir. Bir dijital ikiz geliştirmede ise fotogrametri yöntemi modelin tam temsili en iyi yansıtan yöntemlerin başında gelmektedir. Elde edilen verilerin anlamlı hale getirilmesi ile ortaya çıkan dijital ikizin ise artırılmış gerçeklik gibi görselleştirme araçları ile kullanıcıya aktarılması analiz ve temsile önemli katkılar sunmaktadır.

Bu yazımızda dijital ikizlerin gelişiminde fotogrametri kullanımını ve bu dijital ikizlerin AG ile görselleştirilmesini ele alacağız. Doğruluk, verimlilik ve maliyet etkinliği dahil olmak üzere dijital ikiz oluşturma için fotogrametri kullanımının faydaları aktarılacaktır. AG'nin dijital ikiz görselleştirmedeki rolünü ve erişilebilirlik, esneklik ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimi dahil olmak üzere sağladığı faydalarda çalışmada incelenmiştir. Son olarak, dijital

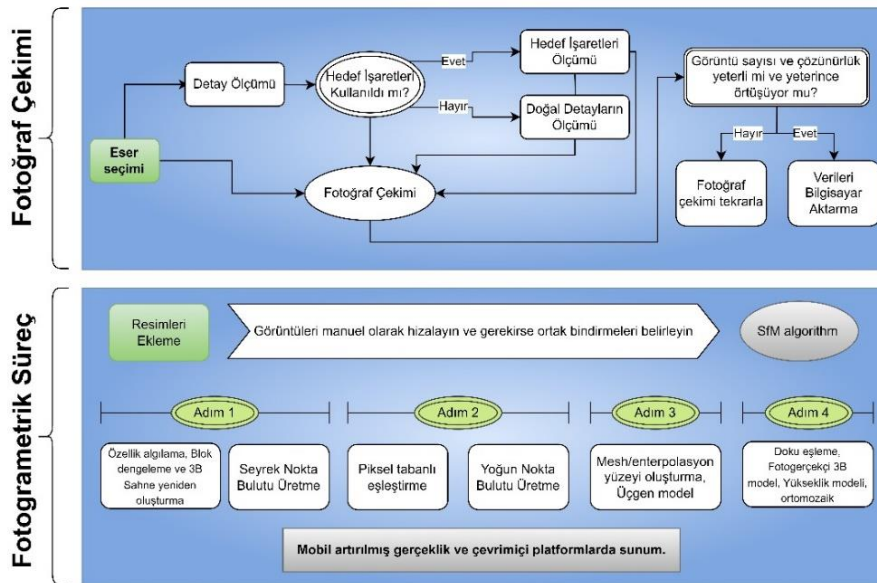
ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametri ve AG'nin geleceğine ve bu teknolojilerin mimarlık, mühendislik, inşaat ve daha fazlası gibi sektörlerde devrim yaratma potansiyeline değinilmiştir. Bu amaçla çalışmada karmaşık yapıda olan ve modellenmesi daha zor olan çeşitli objelerin fotogrametrik nokta bulutları ve fotogerçekçi 3B modelleri üretilerek dijital ikizi en iyi temsil eden senaryolar oluşturulmuştur. Çalışmada fotogrametrik ürünler (nokta bulutu ve 3B model) Context Capture yazılımında SfM algoritması ile üretilmiştir. Elde edilen ürünler, WEB tabanlı artırılmış gerçeklik görselleştirme araçlarına (augment platformu) aktarılarak farklı kullanıcılara sunulma imkânı verilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, gelecekteki dijital ikiz çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirme çalışmalarına katkı sağlayacaktır.

2 Materyal ve metot

2.1 Test nesnelere

Bu çalışma, karmaşık objelerin dijital ikizlerinin oluşturulması ve sanal dünyaya aktarılması tam bir temsiline oluşturulmasını kapsamaktadır. Dijital ikizlerin gelişimi için gerekli ürünleri sağlamak amacıyla düzgün geometriye sahip olmayan karmaşık obje olarak nitelendirilebilecek üç adet heykel seçilmiştir. Heykellerin ilk olarak 3B modellemesi ve temsili için fotogrametrik veri toplama ve işleme yöntemi uygulandı. Dijital görüntüler, yüksek çözünürlüklü mobil telefon kamerası kullanılarak her bir heykelin boyutuna, karmaşıklığına, ayrıntı düzeyine ve kısıtlamalarına göre farklı şekillerde elde edildi. Kullanılan kameranın teknik özellikleri ve objelerin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışmada genel iş akışı Şekil 1'de verilmiştir. İlk olarak dijital ikiz için fotogerçekçi 3B modellerin üretilmesi için kullanılan Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (Structure from Motion/SfM) algoritmasını kullanan fotogrametrik süreç aktarılmış olup ardından artırılmış gerçeklik (AG) ile görselleştirme sağlanmıştır.



Şekil 1. SfM algoritması ile fotogerçekçi 3B model üretiminin genel iş akışı

Tablo 1. Kullanılan kameranın teknik özellikleri ve objelerin boyutları

Kameranın Teknik Özellikleri	Değer		Kullanılan obje		
			En (cm)	Boy (cm)	Yükseklik (cm)
Öz nitelik	Mi6	Obje 1	25	20	40
Kamera Modeli	12 Mp-1.25 µm				
Kamera Çözünürlüğü	16 Milyon	Obje 2	25	20	40
Renk Sayısı	F1.8				
Diyafram Açıklığı	27 mm	Obje 3	30	25	60
Odak Uzaklığı	Var				
Coğrafi Konum Etiketleme					

2.2 Hareket tabanlı yapısal algılama (structure from motion/SfM) ve fotogrametrik süreç

Fotogrametri, görüntülerden gerçek dünyadaki nesnelere ve sahneler hakkında güvenilir geometrik bilgi elde etme bilimi ve teknolojisidir [33, 34]. Görüntüler, kameralar veya elektronik tarayıcılarla donatılmış yer tabanlı, hava veya uzay platformlarından toplanabilir [35]. Üretilen verilerde geometrik bilgiler olarak nokta koordinatları, mesafeler, yükseklikler, alanlar, hacimler, 3B topografya ve 3B modelleri içermektedir [37]. Fotogrametri birçok farklı alanda kullanılırken, temel uygulamalardan biri de topoğrafik haritaların üretilmesinin yanında fotogerçekçi 3B modeller üretmedir. Son yirmi yılda, Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (Structure from Motion/SfM)- Çoklu Görüntü Stereo (Multi-View Stereo/MVS) algoritması, karmaşık yapı ve alanların yeniden yapılandırılmaya yönelik esnek ve düşük maliyetli yaklaşımıyla fotogrametride devrim yaratmıştır [37, 38]. SfM yaklaşımı, metrik veya metrik olmayan kameralarla toplanan görüntüleri kullanarak yüksek çözünürlüklü veriler üretmeyi mümkün kılmıştır [39]. Bu teknik, nesnenin bir dizi iki boyutlu görüntüsünü veya fotoğrafını eşleştirerek odadaki bir nesnenin üç boyutlu bir modelini yeniden oluşturur ve bu nedenle standart kullanım için yüksek maliyetli donanımlar gerektirmez. Bu teknik, özellik tespiti ve eşleştirme için fotogrametrik ilkeleri bilgisayarlı görme algoritmalarıyla birleştirmektedir [40]. Geleneksel fotogrametrimin aksine SfM, kamera yönelimleri veya yer kontrol noktalarının

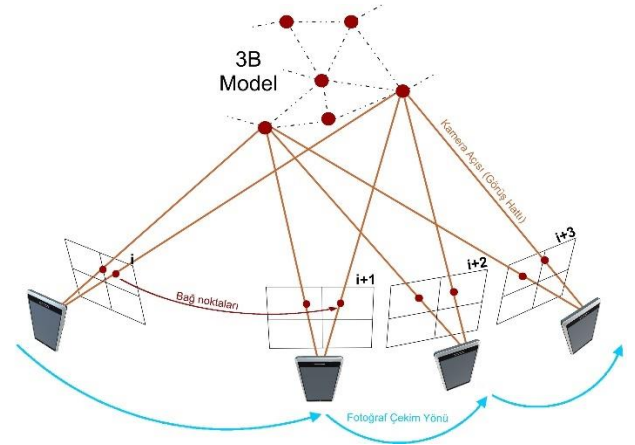
kullanımını hakkında önceden bilgi sahibi olmadan nokta bulutu oluşturmaya olanak tanımasından dolayı süreci oldukça hızlandırmıştır. Özellikle demet ayarlamaya algoritmaları ile birden fazla örtüşen görüntü için aynı anda kamera parametreleri ve yüzey noktası konumları çözülebilmeye süreci önemli katkılar vermiştir. MVS algoritması ise, kapsamlı nokta çıkarımı ile model çözünürlüğünü artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [41]. Ayrıca, SfM/MVS teknolojisi genellikle kırmızı-yeşil-mavi (Red-Green-Blue/RGB) dokulu 3B model üretimde başarısı ile özellikle; harita yapımı, arkeolojik ve mimari, manzaralar, anıtlardaki odalar ve çanak çömlek gibi objelerin 3B modellenmesinde giderek daha yaygın hale gelmiştir [42, 43]. SfM, eğik ve yakınsak görüntüler içeren düzensiz görüntü konfigürasyonlarından sahneyi yeniden oluşturabilir, böylece ölçüm tasarımı ve uygulamasına yönelik gereklilikler giderek azalmıştır. Ayrıca SfM tabanlı yazılımlar ile topografik veya yapı modellerin oluşturulması büyük ölçüde otomatikleştirilmiş işlemeye sahip kullanıcı dostu yazılımlar ile daha da kolaylaşmıştır. Bu faktörler, teknik uzmanlığa ve pahalı ölçme ekipmanına olan ihtiyacı etkili bir şekilde azaltarak, fotogrametriyi mühendislik projelerindeki uzmanlardan amatör fotoğrafçılara kadar geniş bir kullanıcı grubu için erişilebilir hale getirmiştir. [44]. Her ne kadar SfM ile fotogrametri yöntemi amatör kullanılacak için kullanışlı hale gelse de Şekil 2'de görüldüğü gibi bu çalışmada da yapıldığı üzere her objeye ait özel fotoğraf çekim teknikleri oluşturulmalıdır.



Şekil 2. Fotogrametri yöntemi için uygun fotoğraf çekim teknikleri

Yapılan bazı araştırmalar, SfM/MVS teknolojisi ile yapılan 3B modellerin doğruluğunun, bazı istisnalar dışında nispeten büyük nesnelere sınırlı olsa da lazer taramayla yapılanlarla karşılaştırılabilir olduğunu bildirmiştir [45]. LiDAR teknolojisi genellikle yüksek ekipman maliyetleri gerektirdiğinden ve bazen renk bilgisi elde etmek zor olabileceğinden, 2B fotoğraflardan birbiri ile eşleşen görüntüye dayalı olarak bir 3B modeli yeniden oluşturan SfM/MVS ile tam bir dijital ikiz yapılabilmektedir [46]. SfM/MVS teknolojisini kullanan uygulamalarda çok önemli bir teknik konu, fotoğraf veya görüntü elde etme sürecidir. SfM/MVS'nin sonuçları çekilen fotoğraflara bağlıdır, yani odak nesnesinin düşük kapsamı veya düşük kaliteli fotoğraflar bir 3B modelin doğruluğunu büyük ölçüde azaltabilir. Bu yöntemde genellikle algoritmalar kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilir [47]. SfM algoritması, iç yöneltme elemanları için gerekli olan kalibrasyon parametrelerini kendi kendine kalibrasyon tekniği ile çözen bir fotogrametrik algoritmadır. 3B geometri oluşturması için iki veya daha fazla örtüşen görüntüye ihtiyaç vardır. Aynı nesneyi gösteren iki veya daha fazla örtüşen görüntü arasındaki çapraz korelasyona dayanarak, görüntülerin yönü bilinerek yükseklik bilgisi belirlenebilir [48, 49]. Görüntülerdeki her piksel için bu işlem tekrarlanırsa 3B nokta bulutu oluşturulabilir. Nokta bulutu verileri oluştururken LiDAR'a göre yoğun görüntü eşleştirme kullanmanın bir avantajı, renk niteliklerinin noktalar içinde otomatik olarak depolanması ve böylece hem geometri hem de RGB değerleri açısından gerçekliğin fotogerçekçi bir temsili doğrudan sağlamasıdır. SfM algoritması sayesinde ürün üretim sürecinde nispeten düşük maliyet sağlanabilmektedir. Ayrıca fotogrametrik sürecin hızlandırılmasına katkı sağlamıştır. Bu yüzden özellikle 3B model üretimindeki araştırmalarda sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır. SfM algoritmasında bir sahnenin 3B yeniden yapılandırılması için sıralı ve bindirmeli (ardışık fotoğraflar arasında ortak alan) fotoğraf çiftlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2). Bindirmeli fotoğraflar sayesinde ortak noktalar bulunur ve eşleştirilerek sahne tekrarda dijital ortamda üretilir.

Çalışmada dijital ikiz oluşturmak için fotogerçekçi 3B modeller Context Capture yazılımında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yöntem, önce iki fotoğrafın 3B yapısını ve kamera pozlarını ilgili pozlarına göre tahmin ederek başlar (Şekil 3). Ardından sırayla ilave kamera pozları eklenir ve sahnenin yeni bölümleri gözlemlendikçe yeni 3B yapı tahmin edilir. Yüksek kaliteli rekonstrüksiyonları sağlamak ve sürüklenmeyi önlemek için daha fazla kamera eklendikçe blok dengeleme tekrar tekrar gerçekleştirilir. SfM ardışık fotoğrafların, aykırı değerleri filtrelemek ve kamera pozlarını veya yapısını tahmin etmek için genel bir prosedür izler [50, 51]. SfM algoritmasında kamera self kalibrasyon yapılarak performans önemli ölçüde arttırılsa da ancak iyi sonuçlar elde etmek için ön kalibrasyonun hala gerekli olduğu zamanlar olabilmektedir [52].



Şekil 3. 2B fotoğraflardan SfM yöntemi ile 3B yapı ve kamera konumlarının belirlenmesi (Sweeney, 2016, geliştirilmiştir [53])

Çalışmada Context Capture yazılımı içerisindeki algoritmalar ile kameraların iç yöneltme parametreleri otomatik olarak tahmin edilmiştir. Bu aşamada ikili görelî pozlar verilen görüntülerin kamera konumu ve kameraların mutlak yönelimleri tahmin edilerek belirlenmiştir. Yani yapıdaki üçgenleme, iki veya daha fazla görüntü aracılığıyla izlenen bir görüntü koordinatının 3B konumunu hesaplamıştır. Tahmini kamera pozuna sahip tüm kameralar, bir parkurun 3B noktasını tahmin etmek için kullanılır ve yapılan blok dengeleme ile, ilk tahminden sonra bağ noktalarının izi ayarlanır (tüm kamera parametrelerini sabit tutar). Özellikleri doğru bir şekilde üçgenlemek için, noktanın derinliğine göre kameralar arasında yeterli bir taban çizgisi olmalıdır. Derinliği çok yüksek ve taban çizgisi küçük olan noktalar çok hatalıdır. Tahminin başarılı sayılması için en az bir kamera çiftinin tahmini iz için yeterli görüş açısına sahip olması gerekir. Pozlar, iki kameraların (potansiyel olarak kalibre edilmiş) pozlarıdır ve noktalar, 3B noktayı üçgenlemek için kullanılacak eşleşen özelliklerin 2B görüntü noktalarıdır. İki ışın arasındaki en yakın noktayı belirleyerek üçgenleme yapılır. Bu durumda, ışın orijinleri kamera konumlarıdır ve yönler, 3B uzaydaki özelliklerin ışın yönleridir. Bu yöntemin, yeniden yansıtma hatasını en aza indirmede yetersiz olduğu bilinir, ancak diğer üçgenleme yöntemlerinden yaklaşık 10 kat daha hızlıdır. Doğrusal olmayan optimizasyon için ve yeniden projeksiyon hatasını en aza indirmek için tüm kameraları ve 3B noktaları optimize edilir. Eşleşen geometrik olarak doğrulanmış görünüm arasındaki görelî pozları içeren görünüm çiftlerinin yanı sıra kameraların daha önce tahmin edilen genel (mutlak) yönelimleri hesaplanır. Kamera konumları, türetilmiş sınıflar tarafından belirlenen belirli stratejiler ve uygulama ile bu bilgilerden tahmin edilir. Dijital ikiz için 3B model yapım sürecinde yukarıda bahsedilen genel ayarlar yapılmalı ve ardından fotoğraf veri seti incelenerek bir 3B modelin başarıyla oluşturulabileceğini doğrulandıktan sonra sırasıyla 'Fotoğrafları Hizalama', 'Yoğun nokta bulutu oluşturma' ve 'Ağ oluşturma' aşamaları için 'yüksek kalite' seçenekleri

belirlenerek fotogrametrik yazılım aracılığıyla tam ve eksiksiz fotogerçekçi modeller üretilmiştir.

2.3 WEB ve mobil tabanlı artırılmış gerçeklik

Artırılmış Gerçeklik (AG) teknolojisi; ortamda gözlemlenen fiziksel unsurların işitsel, görsel ve fiziksel bilgilerinin bilgisayar ortamında oluşturulan 3 boyutlu model ile zenginleştirilerek farklı bir gerçeklik algısı sunan etkileşimli bir deneyimdir. Bu şekilde, herhangi bir nesne sanal ortamda yeniden oluşturulabilir ve AG uygulamaları için sanal içerik olarak kullanılabilir [54]. Klasik bir nesnenin "sanal" temsilini kullanmanın birçok avantajı vardır: dinamik öğeler içerebilir ve yapının başka türlü gizlenebilecek yönlerine erişime izin verir [55]. Bununla birlikte, dijital ikiz tekniğini kullanarak tam ve kapsamlı bir sunum oluşturmak için, geliştiricilerin ayrıca kullanıcıların sistemle veya kullanıcı arayüzüyle nasıl etkileşime girdiğini anlamaları gerekir [56]. AG uygulamalarını tasarlarken, ilgili nesneye ait bilgileri kullanıcılara aktarmak için en iyi teknoloji araçlarını seçmek önemlidir. Oluşturulan modelin, sunulan kişilerden olumlu geri dönüş alabilmesi için konunun ilgi alanlarına ve ihtiyaçlarına göre karşılık bulması gerekir. Bu nedenle AG uygulamalarının kullanılabilirliğini değerlendirmek çok önemlidir. AG nispeten yeni bir teknoloji olduğundan ve WEB/mobil teknolojinin gelişimi son yıllarda ilerlediğinden, AG uygulamalarının WEB platformlarında ve mobil cihazlar üzerinde oluşturulması "mobil veya WEB tabanlı artırılmış gerçeklik" terimini ortaya çıkarmıştır [57]. AG teknolojisinin mobil cihazlara ve WEB tabanlı görselleştirmelere yönelik uygulamaları pazarlama, oyun, endüstri, eğitim, sağlık, teknoloji, turizm, gibi farklı sektörlerde oldukça fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

Artırılmış gerçeklik (AG), sanal nesnelere gerçek dünyayla harmanlayarak yeni bir etkileşim boyutu sunan bir teknolojidir [58]. WEB tabanlı AG, geliştiricilerin doğrudan WEB üzerinde çalışan AG deneyimleri oluşturmasına olanak tanıyan ve bağımsız bir uygulamaya olan ihtiyacı ortadan kaldıran, hızla gelişen bir alandır [59]. Akıllı telefonların, tabletlerin ve diğer bağlı cihazların yükselişiyle WEB tabanlı AG, AG'yi çok daha geniş bir kitleye ulaştırma potansiyeline sahip. WEB tabanlı AG'nin birincil avantajlarından biri erişilebilirliktir. İndirilmesi ve yüklenmesi gereken yerel AG uygulamalarının aksine, WEB tabanlı AG deneyimlerine basit bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebilir [60]. Bu, geliştiricilerin daha geniş bir kitleye ulaşmasını ve kullanıcıların AG deneyimlerini indirme veya kurulumu ihtiyaç duymadan denemelerini kolaylaştırır. WEB tabanlı AG ayrıca içerik dağıtım açısından daha fazla esneklik sunar. WEB tabanlı bir AG deneyimi ile geliştiriciler, güncellemeleri uygulama mağazalarına göndermeye gerek kalmadan içeriği gerçek zamanlı olarak güncelleyebilir. Bu, daha hızlı yinleme ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimi sağlar. WEB tabanlı AG, eğitim, pazarlama, eğlence ve daha fazlasını içeren çok sayıda uygulamaya sahiptir [61]. Örneğin, eğitimde WEB tabanlı AG, öğrencilerin gerçek dünyadaki sanal nesnelere keşfetmesine olanak tanıyan etkileşimli öğrenme deneyimleri oluşturmak için kullanılabilir. Bu, öğrenmeyi daha ilgi çekici ve etkileşimli

hale getirebilir ve öğrencilerin bilgileri daha iyi tutmasına yardımcı olabilir. Pazarlamada, WEB tabanlı AG, müşterilerin bir ürünün gerçek dünyada nasıl görüneceğini görmelerini sağlayan sanal denemeler [62] gibi etkileşimli ürün deneyimleri oluşturmak için kullanılabilir. Bu, müşteri katılımını artırmaya ve satışları artırmaya yardımcı olabilir [63]. Eğlencede, WEB tabanlı AG, gerçek ve sanal dünyalar arasındaki çizgileri bulanıklaştıran sürükleyici deneyimler oluşturmak için kullanılabilir [64]. Örneğin, sanal karakterlere gerçek dünyada hayat veren AG oyunları, tamamen yeni bir etkileşim düzeyi sunabilir.

Literatürde çeşitli WEB tabanlı artırılmış ve sanal gerçeklik platformları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır. Unity, geniş bir oyun ve simülasyon geliştirme platformudur. Dijital ikizlerinizi Unity ortamında AG ve SG içerikleri için hazırlayabilir ve web tabanlı olarak dağıtabilirsiniz. Unreal Engine, gerçekçi grafikler ve görsel efektler sunan bir oyun motorudur. Üretilen dijital ikizleri Unreal Engine üzerinde oluşturarak AG ve SG platformlarında kullanabilirsiniz. WebGL ile AG ve SG'ler diğer geliştirme platformlarına alternatif olarak, direkt olarak WebGL kullanarak web tabanlı AG ve SG içerikleri oluşturabilirsiniz. A-Frame gibi çerçeveler, bu tür içerikleri oluşturmak için kolay ve kullanıcı dostu araçlar sağlamaktadır. AR.js: AR.js, web tabanlı artırılmış gerçeklik içerikleri oluşturmak için popüler bir JavaScript kütüphanesidir. Bu sayede dijital ikizler tarayıcılar üzerinden kullanıcılara sunulabilir. WebXR, web tarayıcılarında sanal gerçeklik içeriklerinin oluşturulmasını ve kullanılmasını sağlayan bir teknoloji standardıdır. WebXR API'leri kullanarak dijital ikizlerinizi tarayıcılar aracılığıyla SG olarak deneyimlenebilir hale getirebilir. Sketchfab, 3B içeriklerin kolayca yüklenip paylaşılabileceği bir platformdur. Dijital ikizler bu platforma yüklenerek, kolayca erişilebilir ve paylaşılabilir hale getirebilir. Mozilla Hubs, çok kullanıcı sanal gerçeklik dünyalarının kolayca oluşturulup paylaşılacağı bir platformdur. Burada dijital ikizler diğer kullanıcılarla etkileşime girebileceği sanal alanlarda sergilenir. Microsoft Azure Spatial Anchors, eğer artırılmış gerçeklik içeriklerinizin dünyaya sabitlenmesini isteniyorsa, Microsoft Azure Spatial Anchors kullanılabilir. Bu sayede dijital ikizler belirli yerlere sabitlenerek kullanıcılara daha gerçekçi bir deneyim sunulabilir. Bahsedilen platformlar, dijital ikizleri farklı türdeki kullanıcılara ve cihazlara sunmak için çeşitli seçenekler sunmaktadır. Platform seçimi, hedef kitleye ve projenin gereksinimlerine göre yapılması önemlidir.

Bu çalışmada fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modeller ile yapılan dijital ikizler WEB tabanlı Augment artırılmış gerçeklik platformunda sunulmuştur. Augment, kullanıcıların AG deneyimleri oluşturmasını ve yayınlamasını sağlayan WEB tabanlı bir artırılmış gerçeklik platformudur. Platform, mobil veya WEB tabanlı AG aracılığıyla deneyimlenebilen 3B modeller, animasyonlar ve etkileşimli öğeler dahil olmak üzere AG içeriği oluşturmak ve yönetmek için araçlar sağlar. Bir e-ticaret çözümü olan Augment, kullanıcıların evlerinde veya profesyonel ortamlarında akıllı telefonları ve tabletleri aracılığıyla her türlü ürünü ve 3B nesnelere artırılmış gerçeklikte

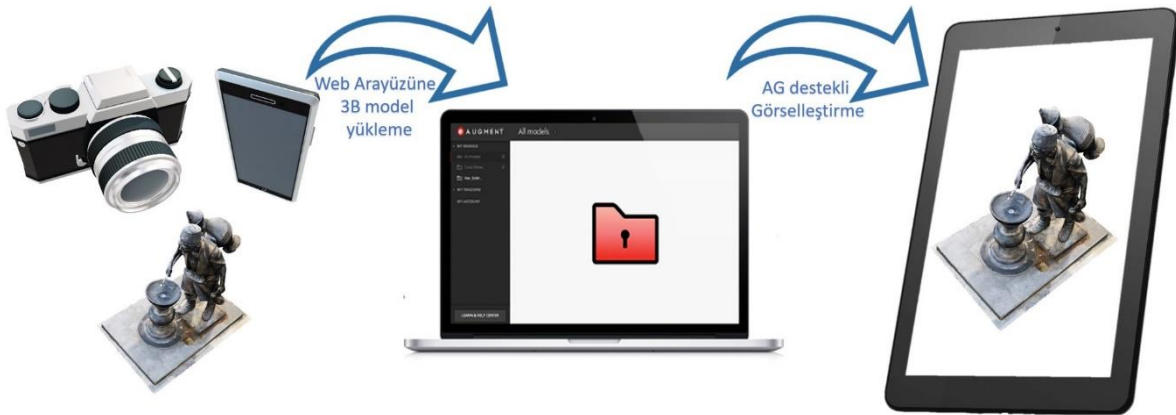
görselleştirmelerine olanak tanır. Bir satış ve pazarlama çözümü olarak ilk olarak kullanıma açılan Augment platformu, kuruluşlara ve ekiplere dönüşümü, verimliliği ve ticari başarıyı artırmak için fiziksel seyahat ve lojistik ihtiyacını azaltan araçlar sağlamaktadır. AG konusunda çok az deneyimi olan veya hiç deneyimi olmayanlar için bile kullanımı kolay olan platform, 3B modelleme araçları, gerçek zamanlı analitik ve özel markalama seçenekleri dahil olmak üzere çok çeşitli özellikler sunmaktadır. Ayrıca tasarım çözümü olarak Augment platformu, doğrulama sürecini hızlandırır ve tersine mühendislikte prototipleme maliyetlerini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Platform, insan işbirlikçi misyonunu ve değerlerini paylaşan tutkulu bir dijital uzmanlar ve profesyoneller ekibi tarafından desteklenmektedir. Augment ayrıca e-ticaret platformları, pazarlama otomasyon araçları ve 3B tasarım yazılımı dahil olmak üzere diğer araç ve platformlarla bir dizi entegrasyon sunar. Bu, kullanıcıların AG'yi mevcut iş akışlarına entegre etmelerini ve hedef kitlelerine daha etkili bir şekilde ulaşmalarını kolaylaştırır. Augment, Flaman-Belçikalı girişimciler ve yatırımcılar ile Salesforce'un kurucu ortakları ve bireysel yatırımcılar arasındaki değer odaklı bir iş birliği olan Vinteor tarafından desteklenmektedir. Platformun diğer türevlerinden ayırt edici özelliği olarak; WEB tabanlı artırılmış gerçeklik uygulaması olmasına rağmen çevrimdışı senkronizasyona sahip olması, casus bağlantı konusunda üst düzey güvenlik sağlaması, sahnelenen ürünü AG'de görüntülerken malzemeleri ve dokuları değiştirebilme özelliğinin olması, malzeme konfigürasyonuna sahip olması, nesnelere gerçek ölçeğinde sunabilmesi, Apple'ın AGKit'ini ve Google'ın AGCore'unu tam olarak desteklemesi ve özelleştirilebilir kullanıcı arabirimi, aynı anda birden çok ürünle karmaşık AG sahnelerini kolayca oluşturulabilmesi ve son olarak AG de sahnelenmesi istenen dijital ikiz ürünlerinin Şekil 4'te gösterildiği gibi kolaylıkla WEB ortamına yüklenebilmesi gibi avantajlar karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak Augment, işletmelerin ve bireylerin AG deneyimleri oluşturması ve yayınlaması için kolay ve erişilebilir bir yol sağlayan güçlü bir WEB tabanlı AG platformudur. Geniş özellik ve entegrasyon yelpazesıyla Augment, mühendislik, pazarlama ve ürün görselleştirmeden eğitim ve öğretime kadar çeşitli kullanım durumları için çok uygundur.

3 Bulgular ve tartışma

3B modelleme çalışmalarında fotogrametrik değerlendirme yazılımı çok önemlidir. Günümüzde piyasada bulunan birçok yazılım bulunmaktadır. Ancak yapılan araştırmanın içeriğine göre fotogrametri yazılımı seçimi oldukça önemlidir. Her yazılımın olağanüstü yetenekleri vardır. Genel olarak en önemli nokta; sonuç, ürünün kalitesi ve işlemlerin kaç adımda ve ne kadar süre aldığıdır. Bu noktada Context Capture yazılımı, fotogrametrik veri üretmek için SfM algoritmasını kullanan önemli yazılımlar arasında fotogerçekçi modellerin üretiminde en çok tercih edilen yazılımlardan biri olduğu için tercih edilmiştir. Şekil 2'de gösterilen fotoğraf çekme senaryosuna göre obje 1, 2 ve 3 için sırasıyla 100, 114, 105 adet fotoğraf çekilmiştir. Fotoğrafların her obje için farklı sayıda olması objenin boyutu ve karmaşıklığı ile entegrelidir.

Fotoğraflar çekildikten sonra fotogrametrik değerlendirme yazılımına fotoğraflar aktarıldı. Fotoğrafları toplamak için kullanılan kameranın sensör boyutu ve odak uzaklığı yazılımın kitaplığından otomatik olarak tanımlandıktan sonra görüntüleme sırası dikkate alınarak hizalama işlemi yapıldı. Buradaki asıl amaç fotoğrafları sıralamak ve bir ön model oluşturmaktır (Şekil 5).

İlk aşama olan fotoğrafları hizalama sürecinden sonra yoğun nokta bulutları ve 3B modeller gibi dijital ürünlerin oluşturulması için yeni iş akışları tanımlanır. Ön dengeleme aşamasında tüm objeler için daha doğru kamera konumu tahminleri elde etmek amacıyla en yüksek ayar seçilmiştir. En yüksek doğruluk ayarında yazılım orijinal boyuttaki fotoğraflarla çalışırken, orta ayar görüntünün 4 kat faktörü ile küçültülmesine neden olurken düşük doğrulukta kaynak dosyaların ölçeği 16 kat faktörü ile küçültülür ve en düşük değer 4 kat daha fazla küçültme anlamına gelmektedir. Bağlantı noktası konumları, kaynak görüntülerde bulunan özellik noktaları temelinde tahmin edildiğinden, bir bağlantı noktasını doğru bir şekilde lokalize etmek için bir kaynak fotoğrafı büyütme anlamlı olabilir. Bununla birlikte, en yüksek doğruluk ayarı yalnızca çok keskin görüntü verileri için ve ilgili işlemin oldukça zaman alıcı olması nedeniyle çoğunlukla araştırma amaçları için önerilmektedir.



Şekil 4. WEB tabanlı artırılmış gerçeklik için iş akışı



Şekil 5. ön dengeleme sonrasında oluşan seyrek nokta bulutu (sol: obje 1 – orta: obje 2 – sağ: obje 3)

Ayrıca en yüksek seçeneği ile fotoğrafların bindirme oranı en düşük olan fotoğrafları da eşleştirirken, diğer alt seçeneklere doğru gidildikçe bindirme oranı yüksek olmayan fotoğraflar eşleştirilmez ve eşleştirilemeyen fotoğraflardan nokta üretilmez. Şekil 5'te gösterilen seyrek nokta bulutu oluşturulduktan sonra modeli ölçeklendirmek için referans hedef işaretleri kullanılarak model ölçeklendirilmiştir. Ardından yoğun nokta bulutu oluşturmak için parametreler ayarlanmıştır. Yoğun nokta bulutu üretiminden daha ayrıntılı ve doğru geometri elde etmek için daha yüksek kalite ayarları kullanılmalıdır ancak bunların işlenmesi için daha uzun süre gerekir. Çalışmada yoğun nokta bulutu için en yüksek ayar seçilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Her modele ait yoğun nokta bulutu (sol: obje 1 – orta: obje 2 – sağ: obje 3)

Yoğun nokta bulutu oluşturulduktan sonra aykırı noktalar manuel olarak temizlenmiştir ve ardından yüzey morfolojisini temsil etmek için dijital bir araç olan düzensiz üçgen ağı üretilmiştir. Üretilen üçgen ağlarından daha sonra katı model üretilmiş ve fotoğraflardan yüksek kaliteli doku kaplanmıştır. Şekil 7'de de gösterildiği üzere son olarak 3B fotogerçekçi dijital ikizler üretilmiştir. Çalışmada kullanılan üç obje için sonuç ürünlere ait fotogrametrik süreç sonucunda ortaya çıkan istatistiksel değerler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 7. Her modele ait fotogerçekçi 3b dijital ikiz (sol: obje 1 – orta: obje 2 – sağ: obje 3)

Tablo 2. Kullanılan objeler ait fotogrametrik değerlendirme istatistikleri

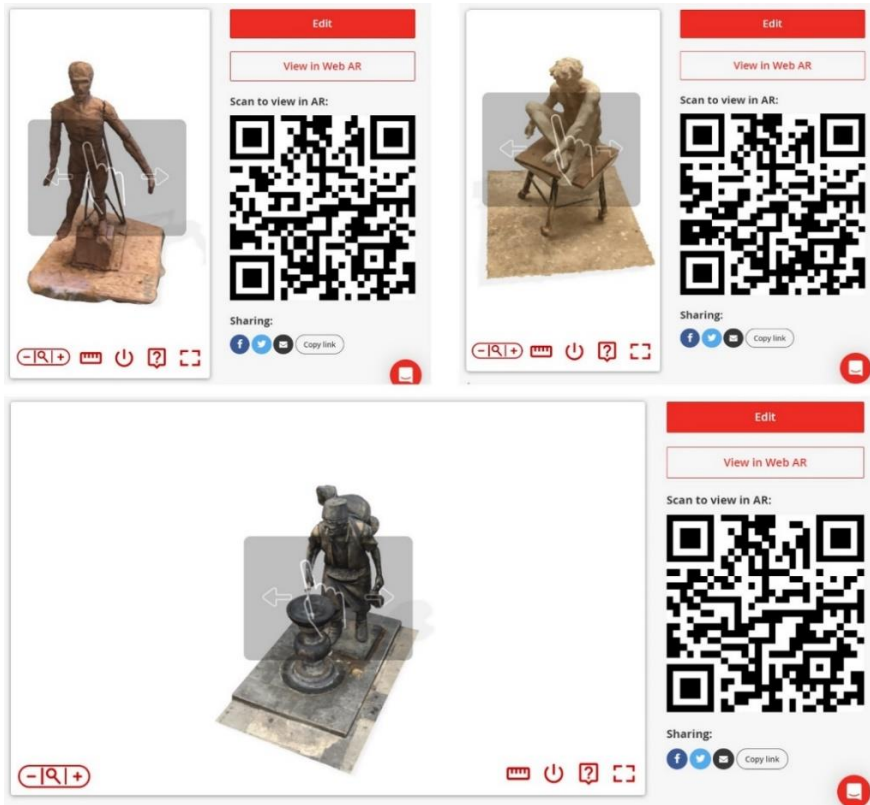
	Fotoğraf Sayısı	Seyrek Nokta Bulutu Sayısı	Yoğun Nokta Bulutu Sayısı	Yüzey/köşe Sayısı	Süre Fotoğraf Çekimi/Fotogrametrik değerlendirme (dakika)
Obje 1	100	28,428	714,947	40,806/20,720	9/28
Obje 2	114	67,840	2,553,223	633,094/366,910	14/54
Obje 3	105	62,397	881,126	584,923/293,067	12/37

Tablo 2 incelendiğinde üretilen yoğun nokta bulutlarının fotoğraf sayısı ile orantılı olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde oluşturulan yüzeyler yoğun nokta bulutundaki her noktanın birleşimi olduğu için gene paralellik göstermektedir. Her üç objeye ait çalışma, Intel® Core™ i7-9700K CPU @ 3.60GHz işlemcili 16GB ram kapasiteli, NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB ekran kartına sahip bir masaüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiş olsa da fotogrametrik süreç her objede farklılık göstermiştir. Objeler 2'ye göre daha fazla olmuştur. Bunun sebebi diğer objelere kıyasla daha ayrıntıya sahip olması ve diğer objelerin obje 2'ye göre daha düzenli olması gösterilebilir.

Fotogrametri yöntemiyle üretilen 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı artırılmış gerçeklik temsili, gerçek dünyada 3B nesnelere görselleştirmek ve keşfetmek için güçlü bir araçtır. Fotogrametri, fotoğraflardan 3B modeller oluşturma yöntemidir ve ortaya çıkan dijital ikizler, mimarlık, mühendislik, inşaat ve daha fazlasını içeren çeşitli sektörlerde kullanılabilir. Fotogrametri tabanlı üretilen 3B modeller eserlerin dijital ikizleri olarak WEB tabanlı artırılmış gerçekliğe entegre ederek, kullanıcılar 3B modelleri daha sürükleyici ve etkileşimli bir şekilde deneyimleyebilirler. Bu amaçla üretilen 3B modeller WEB tabanlı augment artırılmış gerçeklik platformuna aktarılmıştır. Kullanıcılar, cihazlarını gerçek dünya ortamına doğru tutarak, gerçek dünyadaki dijital ikizi görebilir ve nesnenin gerçek konumunda gerçekçi bir temsili sağlar. Bu, kullanıcıların nesnelere boyutunu, ölçüğünü ve uzamsal ilişkilerini daha iyi anlamalarına yardımcı olabilir ve

potansiyel sorunları belirlemeyi veya tasarım kararları vermeyi kolaylaştırabilir.

WEB tabanlı artırılmış gerçeklik, erişilebilirlik avantajı da sunar. İndirme ve kurulum gerektiren yerel AG uygulamalarının aksine, WEB tabanlı AG'ye basit bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebilir ve bu da kullanıcıların AG deneyimine erişmesini kolaylaştırır. Ek olarak, WEB tabanlı AG, gerçek zamanlı güncellemelere ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimine izin vererek içerik dağıtımını açısından daha fazla esneklik sunar. Yüksek performanslı cihazlara duyulan ihtiyaç ve yüksek internet hızları gibi ele alınması gereken zorluklar olsa da fotogrametri yöntemiyle üretilen 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı artırılmış gerçeklik temsiline geleceği umut verici görünüyor. Teknolojide devam eden ilerlemeler ve bağlantılı cihaz pazarının büyümesiyle, önümüzdeki yıllarda bu sürükleyici ve etkileşimli deneyimlerin daha fazlasını görmeyi bekleyebiliriz. Çalışmada üretilen yüksek kalitede 3B fotogerçekçi dijital ikizler daha sonra Augment WEB tabanlı AG görselleştirme platformuna yüklenmiştir (**Şekil 8**). **Şekil 9**'da verilen sanal platformdaki dijital ikizler hem karekod okutularak WEB tabanlı görselleştirilebilir hem de artırılmış gerçeklikte kullanılabilir. Çalışmada kullanılan Objeler için, "https://agmt.it/m/6FoSShSR"; Objeler için, "https://agmt.it/m/XsFmOncT"; Objeler için, "https://agmt.it/m/uTAEERfR"; uzantılar da kullanılabilir. Ek olarak **Şekil 9**'da gösterildiği gibi bir telefon veya tablet aracılığı ile dijital ikizler AG olarak sunulabilir.



Şekil 8. Augment WEB tabanlı AG görselleştirme platformundaki dijital ikizler



Şekil 9. Fotogerçekçi dijital ikizlerin Augment uygulamasında mobil AG ile görselleştirilmesi

4 Sonuçlar

Dijital ikiz, tasarım ve simülasyon, denetim ve eğitim dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılabilen fiziksel bir nesnenin veya sistemin sanal bir temsidir. Dijital ikiz, gerçek zamanlı olarak veri toplamak ve performansı izlemek için kullanılabilen fiziksel nesnenin veya sistemin sanal bir kopyasının oluşturulmasına izin verir. Dijital ikiz oluşturmada genellikle CAD tabanlı çizimler kullanılmaktadır. Fakat gerçek fiziksel nesneyi tam ve eksiksiz temsil için fotogerçekçi 3B modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu anlamda fotogrametri tekniği, fotoğraflardan 3B modeller oluşturmaya imkân verdiği için fotogerçekçi 3B model üretiminde oldukça başarılıdır. Fotogrametri ile bir nesnenin farklı açılardan birden fazla fotoğrafını çekerek, nesnenin 3B modelini oluşturmada çeşitli yazılımlar olsa da kullanım amaçlarına göre fotogrametrik yazılımlar farklılık sunabilmektedir. Dijital ikizlerin yaratılmasında özellikle SfM algoritması ile fotogrametrinin kullanımının çeşitli faydaları olmuştur. Birincisi, fotogrametri, özel ekipman veya uzmanlık gerektirmediğinden, 3B modeller oluşturmada uygun maliyetli ve verimli bir yöntemdir. İkincisi, fotogrametri, bu yöntem kullanılarak oluşturulan 3B modeller gerçek dünya verilerine dayandığından, yüksek düzeyde doğruluk sağlar. Fotogrametri, küçük eserlerden binalara, köprülere kadar küçük veya büyük yapılardan ürünler ve parçalar gibi daha küçük nesnelere kadar çok çeşitli nesnelere için dijital ikizlerin oluşturulmasına izin verir. Dijital ikizlerin yaratılmasında fotogrametri kullanımı, süreçlerini, ürünlerini ve hizmetlerini iyileştirmek isteyen kuruluşlar için güçlü bir araçtır. Verimliliği, doğruluğu ve maliyet etkinliği ile fotogrametri, çeşitli amaçlar için kullanılacak dijital ikizler oluşturmak için erişilebilir ve etkili bir yöntem sağlar.

SfM ile fotoğraflardan 3B modeller oluşturma işlemi olan fotogrametri giderek fotogerçekçi dijital ikiz üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretilen 3B modelleri WEB tabanlı artırılmış gerçeklik (AG) ile birleştirerek, kullanıcılar 3B modelleri gerçek dünyada daha sürükleyici ve etkileşimli bir şekilde deneyimleyebilirler. WEB tabanlı AG'de, SfM tabanlı dijital ikizler gerçek dünyanın üzerine bindirilir ve nesnenin gerçek konumunda gerçekçi bir temsili sağlar.

Bu, kullanıcıların nesnelerin boyutunu, ölçeğini ve uzamsal ilişkilerini anlamasını ve olası sorunları belirlemesini veya tasarım kararları almasını kolaylaştırır.

WEB tabanlı AG, AG'yi daha geniş bir kitleye ulaştırma potansiyeline sahip olsa da ele alınması gereken zorluklar da var. Ana zorluklardan biri, yüksek performanslı cihazlara ve yüksek hızlı internet bağlantılarına duyulan ihtiyaçtır. AG deneyimleri, kaynak yoğun olabilir ve optimum kullanıcı deneyimi sağlamak için yüksek performanslı cihazlar ve yüksek internet hızları gerektirebilir. Diğer bir zorluk da platformlar arası uyumluluk ihtiyacıdır. WEB tabanlı AG deneyimlerine bir WEB tarayıcısı aracılığıyla erişilebilirken, tüm tarayıcılar ve cihazlar AG'yi desteklemez ve sektörde hala bir standardizasyon eksikliği vardır. Bu zorluklara rağmen, WEB tabanlı AG'nin geleceği umut verici görünüyor. AG teknolojisindeki ilerlemeler ve bağlantılı cihaz pazarının büyümesiyle, önümüzdeki yıllarda daha fazla sayıda WEB tabanlı AG deneyimi görmeyi bekleyebiliriz. WEB tabanlı AG, sanal nesnelere gerçek dünyada hayata geçirerek yeni bir etkileşim boyutu sunan, hızla gelişen bir alandır. Erişilebilirliği, esnekliği ve sayısız uygulamasıyla WEB tabanlı AG, daha geniş bir kitleye ulaşma ve dijital dünyayla etkileşim biçimimizi dönüştürme potansiyeline sahiptir. Ele alınması gereken zorluklar olsa da WEB tabanlı AG'nin geleceği parlak görünüyor ve bu alanda sürekli büyüme ve yenilik görmeyi bekleyebiliriz. Ek olarak, WEB tabanlı AG, basit bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebildiği ve indirme veya kurulum gerektirmediği için erişilebilirlik avantajı sunar. Bu, kullanıcıların AG deneyimine erişmesini kolaylaştırır ve gerçek zamanlı güncellemelere ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimine izin vererek içerik sunumu açısından daha fazla esneklik sunar.

Sonuç olarak, SfM ve WEB tabanlı AG'nin birleşimi, gerçek dünyada 3B nesnelere görselleştirmek ve keşfetmek için büyük avantajlar sağlamaktadır. Bağlantılı cihaz pazarının büyümesi ve teknolojideki devam eden ilerlemelerle, önümüzdeki yıllarda bu sürükleyici ve etkileşimli deneyimlerin daha fazlasını görmeyi bekleyebiliriz. Kuruluşlar, fotogrametri ve AG'nin gücünden yararlanarak doğru, sürükleyici ve erişilebilir dijital ikizler

oluşturabilir ve bunları daha iyi kararlar almak, süreçleri iyileştirmek ve ürün ve hizmetlerini geliştirmek için kullanılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %9

Kaynaklar

- [1] M. W. Grieves, Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. Complex Systems Engineering: Theory and Practice. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2019. <https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200>.
- [2] F. Tao, H. Zhang, A. Liu and A. Y. Nee, Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on industrial informatics, 15 (4), 2405-2415, 2018. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
- [3] X. Zheng, J. Lu, and D. Kiritsis, The emergence of cognitive digital twin: vision, challenges and opportunities. International Journal of Production Research, 60 (24), 7610-7632, 2022. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2014591>.
- [4] F. Tao, N. Anwer, A. Liu, L. Wang, A. Y. Nee, L. Li, and M. Zhang, Digital twin towards smart manufacturing and industry 4.0. Journal of manufacturing systems, 58, 1-2, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.005>.
- [5] K. Y. H. Lim, P. Zheng and C. H. A. Chen, State-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. Journal of Intelligent Manufacturing, 31, 1313-1337, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>.
- [6] B. Carrión-Ruiz, S. Blanco-Pons, A. Weigert, S. Fai and J. L. Lerma, Merging photogrammetry and augmented reality: The Canadian Library of Parliament. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42 (2/W11), 367-371, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-367-2019>
- [7] R. F. Grasso, F. Andresciani, C. Altomare, G. Pacella, G. Castiello, M. Carassiti and B. Beomonte Zobel, Lung Thermal Ablation: Comparison between an Augmented Reality Computed Tomography (CT) 3D Navigation System (SIRIO) and Standard CT-Guided Technique. Biology, 10 (7), 646, 2021. <https://doi.org/10.3390/biology10070646>.
- [8] ISO/DIS 23247-1., Automation systems and integration–Digital Twin framework for manufacturing–Part 1: Overview and general principles, 2020.
- [9] C. Wang, Y. K. Cho and C. Kim, Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. Automation in Construction, 56, 1–13, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.001>.
- [10] Y. Yin, P. Zheng, C. Li and L. Wang, A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 81, 102515, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102515>.
- [11] E. J. Tuegel, A. R. Ingrassia, T. G. Eason and S. M. Spottswood, Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. International Journal of Aerospace Engineering, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>.
- [12] J. Wilhelm, C. Petzoldt, T. Beincke and M. Freitag, Review of digital twin-based interaction in smart manufacturing: Enabling cyber-physical systems for human-machine interaction. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 34 (10), 1031-1048, 2021. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1963482>.
- [13] G. Wiegand, C. Mai, Y. Liu and H. Hußmann, Early take-over preparation in stereoscopic 3d. In Adjunct proceedings of the 10th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications, 142-146, 2018, September.
- [14] N. Kikuchi, T. Fukuda and N. Yabuki, Future landscape visualization using a city digital twin: Integration of augmented reality and drones with implementation of 3D model-based occlusion handling. Journal of Computational Design and Engineering, 9(2), 837-856, 2022. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwac032>.
- [15] M. Yakar ve Y. Doğan, Mersin Silifke Mezgit Kale Anıt Mezarı fotogrametrik rölevo alımı ve üç boyutlu modelleme çalışması. Geomatik, 2 (1), 11-17, 2017. <https://doi.org/10.29128/geomatik.296763>.
- [16] A. Kabadayı ve A. Erdoğan, Application of terrestrial photogrammetry method in cultural heritage studies: A case study of Seyfeddin Karasungur. Mersin Photogrammetry Journal, 4(2), 62-67, 2022. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1200146>.
- [17] F. Pulat, M. Yakar ve A. Ulvi, Three-dimensional modeling of the Kubbe-i Hasiye Shrine with terrestrial photogrammetric method. Cultural Heritage and Science, 3(1), 6-11, 2022.
- [18] N. Polat, M. Önal, Y. Kaya, A. Memduhoğlu, N. Kaya, M. Ulukavak, S. Mutlu ve S. Mutlu, Harran Ören Yeri kazısında bulunan kabartma yazıların üç boyutlu olarak modellenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10 (2), 594-601, 2021. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.881781>.
- [19] O. Mırdan ve M. Yakar, Tarihi eserlerin insansız hava aracı ile modellenmesinde karşılaşılan sorunlar. Geomatik, 2 (3), 118-125, 2017. <https://doi.org/10.29128/geomatik.306914>.
- [20] H. İ. Şenol, F. B. Ernst ve S. Akdağ, Kentsel dönüşüm alanlarının geotasarım yöntemi ile planlanması: Eyyübiye örneği. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 3 (3), 63-69, 2018.
- [21] A. Şasi ve M. Yakar, Photogrammetric modelling of hasbey dar'ülhuffaz (masjid) using an unmanned aerial

- vehicle. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3 (1), 6-11, 2018. <https://doi.org/10.26833/ijeg.328919>.
- [22] A. Erdoğan, A. Kabadayı ve E. S. Akın, Kültürel Mirasın Fotogrametrik Yöntemle 3B Modellenmesi: Karabıyık Köprüsü Örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3 (1), 23-27, 2021. <https://doi.org/10.51534/tiha.911147>
- [23] S. M. Sepasgozar, Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*, 10 (13), 4678, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10134678>.
- [24] M. Mohammadi, M. Rashidi, V. Mousavi, A. Karami, Y. Yu, and B. Samali. Quality evaluation of digital twins generated based on UAV photogrammetry and TLS: Bridge case study. *Remote Sensing*, 13 (17), 3499, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13173499>.
- [25] X. Kong, and R. G. Hucks, Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures. *Automation in Construction*, 152, 104928, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104928>.
- [26] K. Themistocleous, E. Evagorou, C. Mettas and D. Hadjimitsis. The use of digital twin models to document cultural heritage monuments. In *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XIII*, 12268, 55-64, 2022. <https://doi.org/10.1117/12.2636332>.
- [27] P. N. Zakharov, A. V. Zhdanov, D. N. Lapaev, P. V. Strelkov and S. O. Maslov, The practice of using digital twins and augmented reality technologies for visualization of innovative products and technologies of enterprises in the region. *Growth Poles of the Global Economy: Emergence, Changes and Future Perspectives*, 1325-1333, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15160-7_135.
- [28] I. Verner, M. Reitman, D. Cuperman, T. Yan, E. Finkelstein and T. Romm, Exposing robot learning to students in augmented reality experience. In *Smart Industry & Smart Education: Proceedings of the 15th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation 15*, 610-619. Springer International Publishing, 2019.
- [29] G. Koutitas, J. Jabez, C. Grohman, C. Radhakrishna, V. Siddaraju and S. Jadon, Demo/poster abstract: XReality research lab—Augmented reality meets Internet of Things. In *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 1-2, 2018, April.
- [30] Z. Wang, K. Han and P. Tiwari, Digital twin-assisted cooperative driving at non-signalized intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 7 (2), 198-209, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIV.2021.3100465>.
- [31] P. Wisely, Digital twinning within a novel human-in-the-loop verification method for HUD safety-critical approach and landing. In *Virtual, Augmented, and Mixed Reality (XR) Technology for Multi-Domain Operations II*, 11759, 124-135, 2021, April.
- [32] P. A. Cruz Franco, A. Rueda Márquez de la Plata, and E. Gómez Bernal. Protocols for the graphic and constructive diffusion of digital twins of the architectural heritage that guarantee universal accessibility through AR and VR. *Applied Sciences*, 12(17), 8785, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12178785>.
- [33] K. Kraus, *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. de Gruyter, 2007. <https://doi.org/10.1515/9783110892871.47>.
- [34] I. Marzloff, J. Ries, S. E. W. Aber and J. S. Aber, *Small-format aerial photography: principles, techniques and geoscience applications*, 2019. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03506-4>.
- [35] M. E. Oruç, Küçük objelerin modellenmesinde videogrametri ve fotogrametri yöntemlerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışma. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3 (2), 62-68, 2021. <https://doi.org/10.53030/tufod.1019385>.
- [36] S. N. G. Hamal ve A. Ulvi, Su altı fotogrametri yöntemi ve kullanım alanı üzerine bir literatür araştırması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 60-71, 2020.
- [37] M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey and J. M. Reynolds, 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 179, 300–314, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- [38] K. Anderson, M. J. Westoby and M. R. James, Low-budget topographic surveying comes of age: Structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43 (2), 163–173, 2019. <https://doi.org/10.1177/0309133319837454>.
- [39] D. Fidan, M. E. Oruç, S. N. G. Hamal and Ş. Fidan, Tersine Mühendislik Uygulamalarında Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanım Olanaklarının Araştırılması; Klasik Otomobiller Örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4 (1), 1-10, 2022.
- [40] M. W. Smith, J. L. Carrivick, and D. J. Quincey, Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40 (2), 247-275, 2016. <https://doi.org/10.1177%2F0309133315615805>.
- [41] H. İ. Şenol ve Y. Kaya, İnternet tabanlı veri kullanımıyla yerleşim alanlarının modellenmesi: çiftlikköy kampüsü örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1 (1), 11-16, 2019.
- [42] S. N. G. Hamal, B. Sarı ve A. Ulvi, Using of hybrid data acquisition techniques for cultural heritage a case study of Pompeiopolis. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2 (2), 55-60, 2020.
- [43] S. D. Uzun, S. N. G. Hamal ve Ş. Fidan, Elde taşınabilir lazer tarayıcılar ile insan yüzünün modellenerek güzellik ve bakım sektöründe kullanımının değerlendirilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4 (1), 17-20, 2022. <https://doi.org/10.51946/melid.1131186>.

- [44] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle and J. Boehm, Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging (3rd edition). Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019.
- [45] B. Sarı, S. N. G. Hamal ve A. Ulvi, Documentation of complex structure using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry method and Terrestrial Laser Scanner (TLS). *Türkiye Lidar Dergisi*, 2 (2), 48-54, 2020.
- [46] Y. Kaya, H. İ. Şenol ve N. Polat, Three-dimensional modeling and drawings of stone column motifs in Harran Ruins. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3 (2), 48-52, 2021. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1012937>.
- [47] A. Memduhoglu, H. İ. Şenol, S. Akdağ ve M. Ulukavak, 3D Map Experience for Youth with Virtual/Augmented Reality Applications. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5(3), 175-182, 2020. <https://doi.org/10.46578/humder.771954>.
- [48] M. Yakar, H. M. Yılmaz ve Ö. Mutluoğlu, Close range photogrammetry and robotic total station in volume calculation. *International Journal of the Physical Sciences*, 5 (2), 86–96, 2010.
- [49] N. Polat ve Y. Kaya, Investigation of the performance of different pixel-based classification methods in land use/land cover (LULC) determination. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3 (1), 1- 6, 2021. <https://doi.org/10.51534/tiha.829656>.
- [50] H. M. Yılmaz, M. Yakar, S. A. Gulec ve O. Dulgerler, Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8 (4), 428-433, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.07.004>.
- [51] M. Yakar, Using close range photogrammetry to measure the position of inaccessible geological features. *Experimental Techniques*, 35 (1), 54-59, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.17471567.2009.00583.x>.
- [52] F. Remondino and S. Campana, 3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage. *BAR international series*, 2598, 111-127, 2014.
- [53] C. Sweeney, Theia vision library, 2016. URL <http://www.theia-sfm.org/sfm.html>.
- [54] R. G. Boboc, F. Gîrbacia and E. V. Butilă, The application of augmented reality in the automotive industry: A systematic literature review. *Applied Sciences*, 10 (12), 4259, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10124259>.
- [55] U. Gürel, Artırılmış gerçeklik yardımı ile öğrenme deneyimi. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 2 (1), 42-45, 2021.
- [56] H. Thwaites, Digital Heritage: What Happens When We Digitize Everything? In *Visual Heritage in the Digital Age*; Ch'ng, E., Gaffney, V., Chapman, H., Eds.; Springer London: London, UK, 327–348, 2013.
- [57] D. W. F. Van Krevelen and R. A. Poelman, Survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International journal of virtual reality*, 9 (2), 1-20, 2010.
- [58] A. Atanasyan and J. Rossmann, An architecture for ar-based human-machine interaction with application to an autonomous mobile robot platform. In *ISR 2020; 52th International Symposium on Robotics*. 1-6, 2020, December.
- [59] S. Discher, R. Richter and J. Döllner, Concepts and techniques for web-based visualization and processing of massive 3D point clouds with semantics. *Graphical Models*, 104, 101036, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2019.101036>.
- [60] A. Prouzeau, Y. Wang, B. Ens, W. Willett and T. Dwyer, Corsican twin: Authoring in situ augmented reality visualisations in virtual reality. In *Proceedings of the international conference on advanced visual interfaces*, 1-9, 2020, September.
- [61] B. Demirezen, Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojisinin turizm sektöründe kullanılabilirliği üzerine bir literatür taraması. *Uluslararası Global Turizm Araştırmaları Dergisi*, 3 (1), 1-26, 2019.
- [62] F. Bilici, Pazarlamada artırılmış gerçeklik ve karekod teknolojileri: tüketicilerin artırılmış gerçeklik teknoloji algılamaları üzerine bir alan araştırması (Doktora tezi). *Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye*, 2015.
- [63] F. N. Koç, Dijital pazarlamanın metaverse fenomenine sunduğu fırsatlar ve sınırlılıklar: Tekstil sektörü incelemesi Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2023.
- [64] İ. Demirbağ, Üç boyutlu sanal dünyalar. *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 6 (4), 97-112, 2020.





Rehabilitasyon uygulamalarına yönelik el ve parmak hareketlerini taklit eden robot el tasarımı

Design of a robotic hand imitating hand and finger gestures for rehabilitation applications

Yağmur Çiğdem Kalan¹ , Eda Akman Aydın^{2*} 

^{1,2}Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

¹ ULAK Haberleşme A.Ş., RAN Yazılım Direktörlüğü, 06530, Ankara, Türkiye

Öz

Rehabilitasyon, motor yeteneklerini kısmen ya da tamamen kaybeden kişilerin, kayıp fonksiyonlarını geri kazanmalarını sağlamalarına yardımcı olan bir terapi sürecidir. Terapi sürecinde tekrarlanan hareketlerin doğruluğu ve sürekliliği rehabilitasyon sürecinin başarısı açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle, rehabilitasyon sürecinin devamlılığını sağlayabilmek adına, egzersizlerin rehabilitasyon merkezlerine gitmeksizin devam ettirilebileceği sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, el rehabilitasyonu uygulamalarına yönelik hem el ve hem de parmak hareketlerini taklit eden bir robot el prototipi uygulaması geliştirilmiştir. El hareketlerini algılamak için Atalet Ölçüm Sistemi (IMU) sensörü, parmak hareketini algılamak için ise bir esneklik sensörü kullanılmıştır. El hareketleri ile robot el prototipi üzerindeki iki motoru kontrol edilmesi, esneklik sensörü ile ise robot üzerindeki kısılcacın kontrol edilmesi ve robot el prototipinin kavrama hareketinin yaptırılması sağlanmaktadır. Katılımcılara, robot el prototipi kullanarak silindirik bir nesneyi hedef noktaya taşıma görevi verilerek, görev tamamlama süreleri kaydedilmiştir.

Anahtar kelimeler: Robot el prototipi, Parmak hareketi, El hareketi, Rehabilitasyon.

1 Giriş

İnme ya da diğer motor hastalık vakalarının çoğunda fonksiyonel hareket yeteneklerinin tam ya da kısmi kaybının yanı sıra, koordinasyon, güç ve beceri kaybı, hareket kabiliyetinde azalma gibi hareket bozuklukları görülebilmektedir [1]. Bu durum hastaların günlük yaşam aktivitelerini yürütme yeteneğini önemli ölçüde engelleyebilmekte, yaşam kalitelerini ve bağımsızlık düzeylerini büyük ölçüde azaltabilmektedir [2]. Rehabilitasyon, hastaların kaybedilen motor yeteneklerini kısmen veya tamamen yeniden kazanabilmelerine, korumalarına ve iyileşmelerine yardımcı olmayı amaçlayan bir terapi sürecidir [3]. Rehabilitasyon egzersizleri, hastaların motor performansını iyileştirmek için hastalığa özgü, tekrarlayan, yoğun ve motivasyonel görevleri içermektedir. Rehabilitasyon, bir görevi hareketlere bölerek, genellikle bir fizyoterapist eşliğinde el gücünü, hareket

Abstract

Rehabilitation is a therapy process that helps people who have lost their motor abilities partially or completely to restore their lost functions. Accuracy and continuity of the repetitive movements in the therapy process are important for the success of the rehabilitation process. Therefore, in order to ensure the continuity of the rehabilitation process, it is necessary to develop systems where exercises can be continued without going to rehabilitation centers. In this study, a robot hand prototype application that imitates both hand and finger movements has been developed for hand rehabilitation applications. An Inertial Measurement Unit (IMU) sensor is used to detect hand movements and a flexible sensor is used to detect finger movements. The hand movements are used to control the two motors on the robot hand prototype, while the flexibility sensor controls the gripper on the robot, allowing the robot hand prototype to grip. The task completion times were recorded by giving the participants the task of moving a cylindrical object to the target point using the robot hand prototype.

Keywords: Robot hand prototype, Finger movement, Hand movement, Rehabilitation

doğruluğunu ve hareket sınırlarını geliştirmek için çeşitli uygulamalarla hareketin desteklenmesini içermektedir. Bu sürece hemen hastalık sonrasında başlamak, hastaların performans artışına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Etkili rehabilitasyon, hastaların egzersiz programlarına uymalarına ve evde ya da fizik tedavi kliniklerinde düzenli performans göstermelerine bağlıdır. Ancak rehabilitasyon sürecinin uzun ve maliyetinin yüksek olması, hastaların motor kısıtlılıkları nedeniyle rehabilitasyon merkezlerine ulaşamaması ve rehabilitasyon süresinin uzaması gibi nedenlerle hasta motivasyonu ve uyumunun zamanla azalması gibi nedenler rehabilitasyon sürecinin takibini ve sürekliliğini ciddi anlamda kısıtlamaktadır [2, 4].

Rehabilitasyon ihtiyacı duyan hasta sayısı ve rehabilitasyon merkezlerinde hastalarla birebir çalışmanın gerektirdiği zorluklar göz önüne alındığında, rehabilitasyon merkezlerinin kapasitesinin ve rehabilitasyon oturumlarında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: edaakman@gazi.edu.tr (E. Akman Aydın)
Geliş / Received: 13.06.2023 Kabul / Accepted: 04.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi:10.28948/ngumuh.1313771

terapistler tarafından sağlanabilecek egzersizlerin sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, rehabilitasyon sürecinin devamlılığı ve performansının iyileştirilmesi için, hastalar günlük rehabilitasyon egzersizlerine evlerinde de devam etmeleri konusunda desteklenmektedir. Ancak rehabilitasyon egzersizleri sırasında terapist tarafından denetim ve geri bildirim sağlanmaması gibi nedenlerle, hastalarının önemli bir kısmının fizyoterapistlerin önerdiği egzersizlere evde devam etmediği görülmektedir. Öte yandan, klinik çalışmalar, yoğun tekrarlayan hareketler içeren rehabilitasyon süreçleri uygulanan felçli hastaların, el motor işlevlerinde önemli iyileşme sağladığını göstermiştir [2]. Bu nedenle, hastaların kliniklerde ya da evlerinde, kendi başlarına sürekli olarak rehabilitasyon egzersizleri yapabilmelerine olanak sağlayarak ve motive ederek, sürecin devamlılığını sağlayabilecek yenilikçi teknolojiler üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir [5]. Bu sistemler ile fizik tedavinin daha erişilebilir olmasının sağlanmasının yanında, maliyetleri düşürerek ve hasta uyumunu artırarak rehabilitasyondan alınacak sonuçları iyileştireceği düşünülmektedir [2, 5].

İnsan-makine arayüzleri (IMA), insanların makineler ile iletişim kurmasını sağlayan sistemlerdir. IMA sistemleri sensörden gelen veriler vasıtasıyla insanların niyetlerini çözümlenerek makinelerin eylemlerini kontrol eder [6]. Endüstriyel kontrol sistemleri, otomotiv, havacılık ve askeri sistemler gibi birçok alanda kullanılan IMA sistemleri, son yıllarda rehabilitasyon ve yardımcı teknolojiler alanında da kullanılmaktadır [6, 7]. Rehabilitasyon sistemleri açısından bakıldığında, IMA, insanların hareketleri ya da hareket niyetlerinin algılanmasını sağlayan giriş birimleri, giriş biriminden gelen verilerin işlendiği ve harekete ilişkin anlamlı komutlara dönüştürüldüğü sinyal işleme ve örüntü tanıma birimi ve bu hareket/hareket niyetlerinin aktarıldığı çıkış birimlerinden oluşmaktadır.

Sağlıklı insanlar proprioepsiyon duyusu olarak adlandırılan vücudun pozisyon hissi duyusuna sahip olmalarına rağmen, bu his inme ya da diğer motor nöron hastalıklarına sahip kişilerde çok zayıf olabilmektedir. Bu nedenle, IMA tabanlı rehabilitasyon sistemlerinde, çıkış birimleri aynı zamanda, insanların yaptıkları hareketlere ilişkin beyne geri bildirim sağlamak amacıyla da kullanılmalıdır. Hareket durumunun ya da hareket performansının geri bildirimine yönelik olabilecek bu geri besleme, görsel, işitsel, dokunsal ya da çok-modlu olarak sağlanabilir. Verilen bir hareket görevini tamamlama sonrasında sağlanan geri bildirim, beyinde hareketin yeniden düzenlemesine yardımcı olmanın yanında, motor geribildirim döngüsünü güçlendirerek bir sonraki harekette daha fazla motivasyona sağlamaktadır. [8]. Çıkış birimi olarak kullanılan giyilebilir dış-iskeletler ve end-efektör cihazlar gibi rehabilitasyon robotlarının [9] çoğu, biyolojik eklemlerin dış iskeletinkilerle hizalanmasını gerektirmektedir. Bu sistemler ayrıca, genellikle klinik kullanım için tasarlandıkları için taşınabilir değildirler ve pahalıdırlar [2]. Bu nedenle, son yıllarda, sanal gerçeklik [10-11] ve oyun temelli rehabilitasyon sistemleri [12], hastaları evde rehabilitasyon egzersizlerine devam etmelerine teşvik etme potansiyeline sahiptir.

Oyun tabanlı rehabilitasyon sistemlerinde, çıkış birimi olarak genellikle bilgisayar oyunları kullanılmaktadır ve hareketlere ilişkin geri besleme de oyun arayüzleri aracılığıyla sağlanmaktadır [13]. Bunun yanında robotik sistemleri çıkış birimi olarak kullanan uygulamalar da geliştirilmektedir. Fitter ve arkadaşları [14], bileğe yerleştirilen IMU sensörleri ile çift-el alkış oyunları oynayan robotik uygulamalar geliştirmiştir. Segal ve arkadaşları [15] ise, rehabilitasyon terapisi için, standart fizik tedavi sürecine alternatif taşınabilir, düşük maliyetli, kullanımı kolay ve ilgi çekici bir alternatif olarak el hareketleri ile kontrol edilen bir araba önermiştir.

Rehabilitasyon amaçlı IMA için giriş birimleri, kasın mekaniksel hareketinin algılanması, vücut hareketlerinin algılanması, biyo-potansiyel sinyaller ile hareketin algılanması ya da bu sistemlerin bir arada kullanıldığı hibrit sistemler ile oluşturulabilir [6]. El rehabilitasyon sistemlerinde, hareketin veya hareket niyetinin anlaşılması için, hastaların geri kalan hareket kabiliyetlerine göre, kontrol sinyali olarak kuvvet ya da fizyolojik sinyaller kullanılabilir. Fizyolojik sinyallere dayalı rehabilitasyon sistemlerinde, sistem, doğrudan kullanıcının uzvundan ölçülen fizyolojik sinyallerini kullanarak, belirli bir hareketi gerçekleştirme niyetini ya da hareketi uygulaması sırasında kaydedilen sinyalleri analiz ederek, kullanıcının gerçekleştirmek istediği hareketi tahmin edilir [3]. Bu amaçla hastanın kalan motor yeteneklerini de göz önüne alarak elektroensefalogram, elektromiyogram ya da birden çok sinyali bir arada kullanan hibrit sistemler kullanılmaktadır. Bunun dışında görüntü işleme ve veri eldivenleri yoluyla el pozisyonunu algılayan sistemler de el rehabilitasyon sistemlerinde kullanılmaktadır [16].

Atalet Ölçüm Sistemi (Inertial Measurement Unit (IMU)) esas olarak açısal hız, lineer ivmelenmeyi ölçmek için cihazlarda kullanılmaktadır. IMU bir cihazın veya aracın hızını, dönme açısını ve oryantasyonunu ölçmek için kullanılmaktadır. IMU, ivmeölçer ve jiroskop olmak üzere iki sensör içermektedir. Böylece IMU x, y ve z koordinatlarındaki hareketlerden ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinden toplamda 6 veri ölçülmesiyle lineer ivmelenme, oryantasyon açısı ve açısal hız bilgilerini altı serbestlik derecesinde (6DOF) elde edebilmektedir [17]. IMU sensörleri ve endüstriyel uygulamalarda el tabanlı teleoperasyon robotların geliştirilmesi [18], navigasyon sistemleri, artırılmış gerçeklik sistemleri, robotik ve rehabilitasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. IMU, IMA hareket tanıma amacıyla yaygın olarak kullanılan bir sensördür [19-21]. Üst uzuv rehabilitasyonunda, hızlanma ve oryantasyon gibi kinematik bilgiler IMU'lar tarafından ölçülebilmektedir [22, 23]. Esneklik sensörleri ise parmak hareketlerine dayalı rehabilitasyon sistemleri için yaygın olarak kullanılan bir sensördür [24, 25].

Bu çalışmada, rehabilitasyon uygulamalarına yönelik olarak kullanılacak hem el ve hem de parmak hareketlerini taklit eden bir robot el prototipi tasarlanmıştır. Çalışmada hem IMU hem de esneklik sensörlerini bir arada kullanarak el ve parmak rehabilitasyonunu bir arada uygulayabilen bir sistem önerilmiştir. Rehabilitasyon robotu

ile amaçlanan, kullanıcının yapmak istediği el hareketlerinin algılanarak bu hareketlerle bir robot el prototipinin kontrol edilmesini sağlamaktır. Böylece kullanıcılara robot hareketlerini takip etmeleri vasıtasıyla geri bildirim sunulmakta ve bu sayede hareket kabiliyetlerini geliştirmelerine katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Kullanıcı arayüzünde, parmak ve el hareketlerini algılamak için, sırasıyla esneklik sensörü ve IMU sensörü kullanılmıştır. Sensörlerden gelen pozisyon bilgilerinin robot el prototipine aktararak, kullanıcının el hareketlerini taklit etmesi sağlanmıştır. Çıkış birimi olarak makine arayüzü kısmında dört eksende hareket edebilen bir robot el prototipi kullanılmıştır. Robot el prototipi çalışması üç sağlıklı kişinin, bir nesneyi robot el prototipi kullanarak taşıması görevini tamamlama süresi üzerinden değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metod

Bu bölümde, rehabilitasyon uygulamalarına yönelik, el ve parmak hareketlerini taklit eden robotik el sisteminin donanımsal ve yazılımsal tasarımına ait detaylar sunulmaktadır. Çalışmada, IMA etkileşiminde insan arayüzü kısmında el hareketlerinin algılanması amacıyla bir eldiven; el hareketlerinin yansıtılması ve kullanıcıya geri bildirim sağlanması amacıyla makine arayüzü kısmında ise bir robot el prototipi kullanılmıştır.

2.1 Donanımsal tasarım

Bu çalışmada geliştirilen sisteme ait blok diyagram Şekil 1'de görülmektedir. El ve parmak hareketlerinin algılanması amacıyla, sistemin insan arayüzü kısmında, hareketlerin algılanması için, giyilebilir bir eldiven üzerine bir adet esneklik sensörü ve bir adet IMU sensörü yerleştirilmiştir.

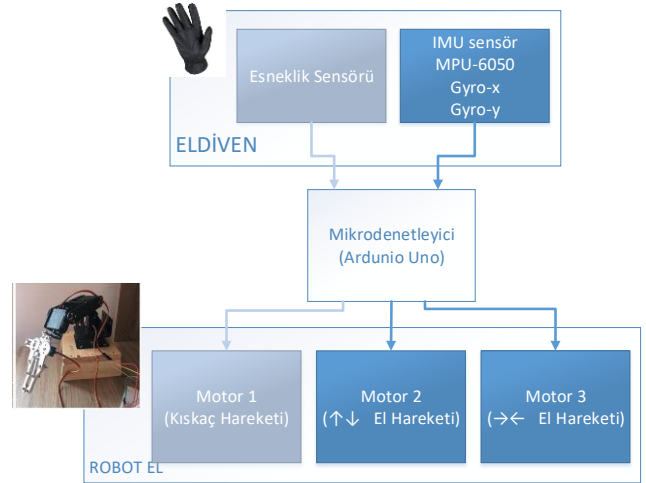
Esneklik sensörü, robot el prototipinin üzerindeki kısıp hareketlerini kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Esneklik sensörü, bükülme derecesine göre direnç değeri değışen bir sensör çeşididir. Sensörün bükülme derecesi sıfır iken, yani sensör düz konumdayken, gösterdiği direnç değeri sıfır iken, sensör bükülmeye başladıkça okunan direnç değeri de artmaktadır. Bu çalışmada esneklik sensörü, Şekil 2'de görülen giyilebilir eldiven üzerinde işaret parmağı üzerine yerleştirilmiştir.

IMU sensörü, herhangi bir nesnenin üç farklı x, y ve z ekseninde olmak üzere lineer ivmelenme ve açısal hızını ivmeölçer ve jiroskop sensörleri aracılığıyla ölçen bir modüldür. Jiroskop sensörü, sabit duran bir nesnenin üç ekseninde de hareketlerini açısal oranlarla karşılaştırarak açısal hızını ve yönünü ölçer [7]. Bu çalışmada, el hareketlerinin algılanması için MPU-6050 IMU sensörü kullanılmıştır. MPU 6050 üç eksenli jiroskop ve üç eksenli açısal ivmeölçer bulunduran toplamda üç eksen altı veri elde eden bir IMU sensör kartıdır. Kart üzerinde bir voltaj regülatörü bulunur ve 5-3.3 V dönüşüm sağlamaktadır. I²C haberleşme protokolü ile çalışmaktadır. Her ekseninde 16 bitlik bir çıkış üretmektedir.

IMU sensörü, pitch, roll ve yaw olmak üzere üç eksendeki eksen açılarının ölçülmesini sağlar. Pitch y ekseninin etrafındaki dönüşü, roll x ekseninin etrafındaki dönüşü ve yaw ise z ekseninin etrafındaki hareketi temsil etmektedir. Pitch, roll ve yaw eksenlerindeki el hareketleri Şekil 3'te

görülmektedir. Bu çalışmada elin aşağı-yukarı ve sağ-sol yönlü hareketlerini algılayabilmek için IMU sensörün sırasıyla pitch ve roll eksenlerindeki açıların çıkış değerleri kullanılmıştır. Giyilebilir eldiven üzerine yerleştirilen esneklik sensörü ve IMU Şekil 2'de görülmektedir.

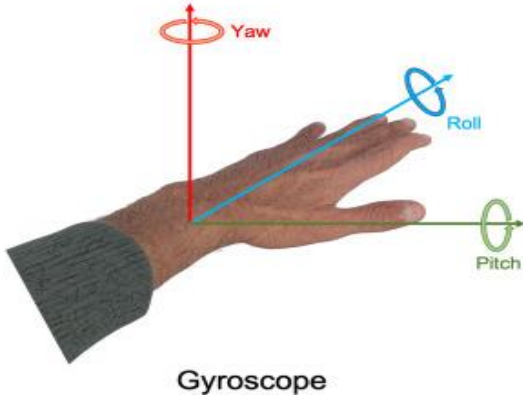
Bu çalışmada, çıkış birimi, kullanıcıya yaptığı el hareketleri ile ilişkili hareketleri sonucunu izleme ve bu yolla geri bildirim sağlamak amacıyla kullanılırken aynı zamanda kullanıcının görev tamamlama motivasyonunun artırılmasını sağlamaktadır. Çıkış birimi olarak üzerinde dört adet servo motor kullanılan bir robot el prototipi modeli kullanılmıştır. Bu motorlardan bir tanesi, parmak hareketleri ile kontrol edilen kısıp kontrol ederken, diğer iki tanesi el eklem noktalarındaki hareketleri kontrol etmektedir. Çalışmada çıkış birimi olarak kullanılan robot el prototipi, el hareketleri ile ilişki eksen hareketleri Şekil 4'te görülmektedir.



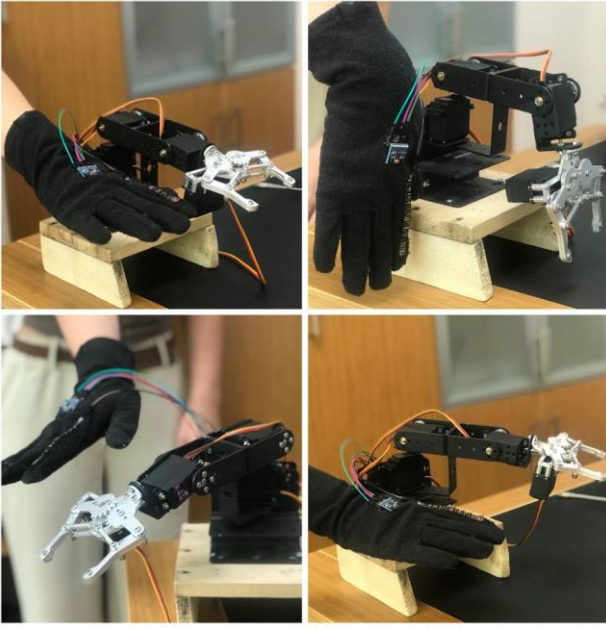
Şekil 1. Sistem blok diyagramı



Şekil 2. Kullanıcı birimi: Giyilebilir eldiven



Şekil 3. IMU sensörün jiroskop hareket eksenleri



Şekil 4. Çıkış birimi: Robot el prototipi ve eksen hareketleri

2.2 Kontrol algoritması

Çalışmada geliştirilen robot el prototipinin kontrol algoritması Şekil 5'te görülmektedir. İlk olarak eldiven üzerindeki sensörlerden alınması istenilen başlangıç parametre değerleri ve değişken tanımlamaları yapılmıştır. Eldiven üzerinde yer alan esneklik sensörü ile MPU-6050 sensöründen gelen açı değerleri okunarak, kontrol algoritmasında belirlenen değişkenlere atanmıştır.

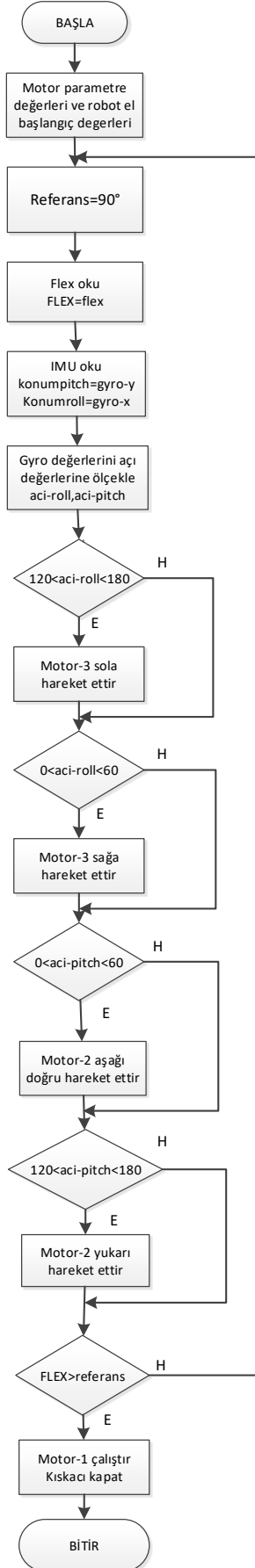
Esneklik sensörü bükülme mantığı ile direnci değişen bir devre elemanıdır. Bu sensör kullanılarak robot el prototipinin kısaç hareketinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Kısaç hareketi parmak görevi görerek 0 ve 90° açı değerlerine uygun olarak çalışmaktadır. Eldiven üzerinde işaret parmağı üzerinde dikilerek kullanılan esneklik sensörü ile kısaç hareketi açılmakta ve kapanmaktadır. Algoritma oluşturulurken ve parmağın konumuna uygun açı değerleri belirlenirken, arduino seri port ekranı üzerinde esneklik sensörü için okuma yapılmıştır. Sensörün bükülme derecesi ile değişen direnç değerleri saptanarak 650 ohm direnç

değeri referans alınmıştır. Parmak 0° konumda iken kısaç ağzı açık konumda bulunurken, parmağın 90° ve üstü açılarda bükülü durumda iken kısaç kapanma hareketini gerçekleştirmektedir. Açı değerlerinin belirlenmesinin ardından, uygun açı değerlerine karşılık gelen kısaç hareketleri algoritmada tanımlanmış, robot el prototipinin kısaç hareketini kontrol eden motorunun çalışması sağlanmıştır.

Çalışmada IMU sensör olarak MPU-6050 kullanılmıştır. Çalışmada IMU sensörün x ve y eksenleri kullanılmıştır. X eksenini ile robot el prototipinin sağa ve sola olmak üzere 0-180° arasında el hareketini gerçekleştirilmektedir. Başlangıç pozisyonunda el düz konumda iken x ve y eksenleri 90°'lik açıya karşılık gelmektedir. Elin istenmeden yapılabilecek hareketlerini önlemek için 60-90° ve 90-120° hareketler değerlendirme dışı bırakılarak bir güvenlik aralığı oluşturulmuştur. X ekseninde 0-60 ve 120-180° açıları arasında ise elin x ekseninde sırasıyla sağ ve sola olmak üzere hareketi gerçekleştirir. IMU sensör 60-120° açıları arasında bir açı değeri algırsa ise robot el prototipi hareket etmemektedir. Bu aralık robot el prototipinin daha hassas hareket etmesi ve eldeki ufak açı değişimlerini algılamayarak hareket etmemesi için ayrılmıştır. Y eksenindeki açı değeri ise robot el prototipinin aşağı ve yukarı yönündeki hareketi IMU ile algılanarak ölçülmektedir. Elin 0-60° arasındaki açı değişimlerine göre robot el prototipinin aşağı, 120-180° hareketi ile robot el prototipinin yukarı doğru hareket etmesi sağlanmaktadır. Açı değerleri, kullanıcıların hareket yetenekleri dikkate alınarak kişiye özel olarak belirlenebilir. Ölçülen açı değerleri ölçeklenerek servo motorları kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır.

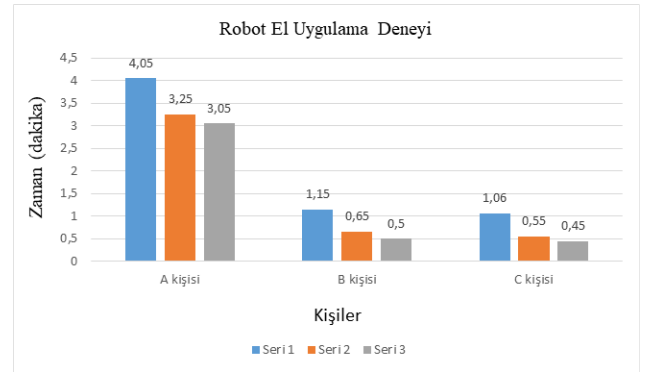
3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışma ile, sağlık alanında rehabilitasyona ihtiyaç duyan hastaların el hareketlerini taklit etmesi yoluyla el ve parmak hareketlerinin iyileşmesine yardımcı olabilecek bir rehabilitasyon robotunun prototipi geliştirilmiştir. Çalışmada geliştirilen sistemin kullanılabilirliği, silindirik bir cismin mevcut konumundan hedeflenen konuma taşınması için geçen sürenin ölçülmesi üzerinden değerlendirilmiştir. Bu amaçla, farklı yaş ve cinsiyette üç sağlıklı kullanıcının tasarlanan giyilebilir eldiveni giyerek önerilen senaryodaki görevi tamamlamaları istenmiştir. Deney öncesinde, katılımcılara robot elin hareket eksenleri ve eldiven yardımı ile nasıl kontrol edilebileceği, hangi sensörlerin hangi görevleri yapmakta kullanılacağı anlatılmış ve uygulamalı olarak gösterilmiştir. Deney süresince uygulanan senaryoya göre, tüm denekler başlangıç noktasında durmakta olan ağırlığı 250 gram silindirik bir cisim 80 cm uzaklıktaki hedef noktaya bırakmakta, ikinci aşamada ise aynı nesneyi bulunduğu noktadan alarak başlangıç noktasına geri götürerek bırakmaktadır. Bu deney her bir kişi için üç defa tekrar etmiş ve görevi tamamlama süreleri kaydedilmiştir. Üç denek için her tekrarda verilen görevin tamamlanması için geçen süreler Şekil 6'da gösterilmiştir



Şekil 5. Kontrol algoritması akış diyagramı

Buna göre, denek A'nın üç denemesinde verilen görevi tamamlama süresi sırasıyla 4.05, 3.25 ve 3.05 dakika olduğu görülmektedir. Denek B üç görevi sırasıyla 1.15, 0.65 ve 0.5 dakikada tamamlamıştır. Denek C ise 1.06, 0.55 ve 0.45 dakikada verilen görevi tamamlamıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi, tüm deneklerin verilen görevi tamamlama süreleri farklılık göstermektedir. Deney süreleri incelendiğinde, katılımcıların her bir denemede görev tamamlama sürelerinin kısaldığı ve sistemi kullanım hızlarının arttığı görülmüştür. Verilerden yola çıkarak uygulama sayısının artmasının, deneyin daha fazla uyum sağlayarak eldivenle robot el prototipinin daha aktif ve kolay kullanılmasını sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 6. Kullanıcıların görev tamamlama süreleri

IMA tabanlı rehabilitasyon sistemleri, hastaların rehabilitasyon süreçlerinin sürekliliğinin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çıkış biriminin sanal gerçeklik ve oyun tabanlı sistemler üzerinden sağlandığı birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak mevcut ticari oyunlar rehabilitasyon sistemlerinde hastalığa özgü durumlar için uygun olmayabilmektedir. Bu nedenle hastalığa ve amaca yönelik oyunların tasarlanması gerekmektedir. Rehabilitasyon amacına yönelik olmayan sanal gerçeklik cihazlarının kullanımı ise klinik çıktıların değerlendirilmesini zorlaştırabilmektedir. Çıkış birimi olarak robotik sistemlerin kullanımının, hastalara hareket, hareket kuvveti ve yoğunluğuna ilişkin önemli geri bildirimler sağlayabilme avantajları bulunmaktadır [13].

Literatürde, el rehabilitasyon sistemlerinin geliştirilmesinde hem IMU sensörler hem de esneklik sensörleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Rehaimi ve arkadaşları [24] el bileğinin rehabilitasyonu amacıyla esneklik sensöründen faydalanmıştır. Garda ve arkadaşları [25] esneklik sensörleri ile bir rehabilitasyon sistemi üzerine çalışmıştır. Öte yandan, IMU sensör de çeşitli çalışmalarda el rehabilitasyonu amacıyla kullanılmıştır [15, 22, 23]. Ancak bu çalışmalarda IMU sensör ve esneklik sensörleri genellikle ayrı sistemlerde kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, IMU ve esneklik sensörünün bir arada kullanılması ile el ve parmak rehabilitasyonunun aynı anda uygulanmasını sağlayabilecek bir sistem önerilmiştir.

4 Sonuçlar

Rehabilitasyon, hastaların hareket yeteneklerini geri kazanmalarını sağlamak için fizyoterapistler eşliğinde sürdürülen, bir terapi sürecidir. Rehabilitasyon sürecinin devamlılığı terapinin başarısı açısından önemlidir, bu nedenle hastaların rehabilitasyon süreçlerini evlerinde devam ettirecekleri uygulamaların geliştirilmesi önem taşımaktadır. Bununla birlikte, rehabilitasyon sürecinde, hastaların kendilerine verilen motivasyonel görevleri tamamlamalarına ilişkin geri bildirim verilmesi, özellikle hareket hissi kaybı yaşayan hastalara hareketlerin öğretilmesi ve sürecin başarısı açısından önemlidir.

Bu çalışmada, el rehabilitasyonu uygulamalarında kullanılmak üzere el ve parmak hareketlerini taklit eden bir robot el prototipi tasarlanmıştır. Kullanıcıların kendilerine verilen görevi, kendi el hareketlerini taklit eden ile bir robot el prototipi yaptırılmaları ve robot el prototipinin hareketlerini izleyerek geri bildirim almaları sağlanmaktadır. Rehabilitasyon amaçlı geliştirilen bu uygulama aynı zamanda endüstriyel alanda ve bomba imha robotları gibi güvenlik gerektiren işlerde de kullanılmak üzere modifiye edilebilir. Ayrıca geliştirilen bu uygulamanın daha hızlı tepki süreleri ve yüksek hassasiyetli denetiminin sağlanması için çeşitli kontrol algoritmaları ile denetlenmesi üzerine çalışmalar sürdürülebilir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] A. Mandeljc, A. Rajhard, M. Munih, R. Kamnik, Robotic Device for Out-of-Clinic Post-Stroke Hand Rehabilitation. *Applied Sciences*, 12 (3), 1092, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12031092>.
- [2] P. Polygerinos, Z. Wang, K.C. Galloway, R. J. Wood, C.J. Walsh, Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, 73, 135-143, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.014>.
- [3] M. Mulas, M. Folgheraiter, G. Gini, An EMG-controlled exoskeleton for hand rehabilitation. 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. 371-374, 2005. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2005.1501122>.
- [4] S. Almasi, H. Ahmadi, F. Asadi, L. Shahmoradi, G. Arji, M. Alizadeh, H. Kolivand, Kinect-Based Rehabilitation Systems for Stroke Patients: A Scoping Review. *BioMed Research International*, 4339054, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4339054>.
- [5] Y.X. Hung, P.C. Huang, K.T. Chen, W.C. Chu, What Do Stroke Patients Look for in Game-Based Rehabilitation: A Survey Study. *Medicine (Baltimore)*, 95 (11), e3032, 2016. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000003032>.
- [6] D. Esposito, J. Centracchio, E. Andreozzi, G.D. Gargiulo, G.R. Naik, P. Bifulco, Biosignal-Based Human-Machine Interfaces for Assistance and Rehabilitation: A Survey. *Sensors (Basel)*, 15, 21(20), 6863, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21206863>.
- [7] H.P. Singh, P. Kumar, Developments in the Human Machine Interface Technologies and Their Applications: A Review. *J. Med. Eng. Technol*, 45, 552-573, 2021. <https://doi.org/10.1080/03091902.2021.1936237>.
- [8] Z. Yue, X. Zhang, J. Wang, Hand Rehabilitation Robotics on Poststroke Motor Recovery. *Behav Neurol*, 2017:3908135, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3908135>.
- [9] Kabir R, Sunny MSH, Ahmed HU, Rahman MH. Hand Rehabilitation Devices: A Comprehensive Systematic Review. *Micromachines (Basel)*. 2022 Jun 29;13(7):1033. <https://doi.org/10.3390/mi13071033>.
- [10] H. Feng, C. Li, J. Liu, L. Wang, J. Ma, G. Li, L. Gan, X. Shang, Z. Wu, Virtual Reality Rehabilitation Versus Conventional Physical Therapy for Improving Balance and Gait in Parkinson's Disease Patients: A Randomized Controlled Trial. *Med Sci Monit*, 25, 4186-4192, 2019. <https://doi.org/10.12659/MSM.916455>.
- [11] P. Tokgöz, S. Stampa, D. Wähnert, T. Vordemvenne, C. Dockweiler, Virtual Reality in the Rehabilitation of Patients with Injuries and Diseases of Upper Extremities. *Healthcare (Basel)*, 10, 6, 1124, 2022. <https://doi.org/10.3390/healthcare10061124>.
- [12] R. Feingold-Polak, O. Barzel, S.A. Levy-Tzedek, A robot goes to rehab: a novel gamified system for long-term stroke rehabilitation using a socially assistive robot—methodology and usability testing. *Journal NeuroEngineering Rehabilitation*, 18, 122, 2021. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00915-2>.
- [13] Y. Chen, K.T. Abel, J.T. Janeczek, Y. Chen, K. Zheng, S.C. Cramer, Home-based technologies for stroke rehabilitation: A systematic review. *Int J Med Inform*, 123, 11-22, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2018.12.01>.
- [14] N. T. Fitter, K.J. Kuchenbecker, Teaching a Robot Bimanual Hand-Clapping Games via Wrist-Worn IMUs. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 85, 2018. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00085>.
- [15] A.D. Segal, M.C. Lesak, A. K. Silverman, A.J. Petruska, A Gesture-Controlled Rehabilitation Robot to Improve Engagement and Quantify Movement Performance. *Sensors*, 20, 15, 4269, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154269>.
- [16] C. Liu, J. Lu, H. Yang, K. Guo, Current State of Robotics in Hand Rehabilitation after Stroke: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 12, 9, 4540, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12094540>.

- [17] A. Norhafizan, R.A.R. Ghazilla, N.M. Khairi, V. Kasi, Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1, 2, 256-262, 2013. <https://doi.org/10.12720/ijsp.1.2.256-262>.
- [18] S. Li et al., "A Mobile Robot Hand-Arm Teleoperation System by Vision and IMU. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 10900-10906, Las Vegas, NV, USA, 2020. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9340738>.
- [19] M. Kim, J. Cho, S. Lee, Y. Jung, IMU Sensor-Based Hand Gesture Recognition for Human-Machine Interfaces. *Sensors*, 19, 18, 3827, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19183827>.
- [20] M. Meghana et.al., Hand gesture recognition and voice controlled robot. *Materials Today: Proceedings*, 33, 7, 4121-4123, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.553>.
- [21] Y. Ozlük, E.A. Aydın, Fuzzy Logic Control of a Head-movement Based Semi-autonomous Human-machine Interface. *Journal of Bionic Engineering*, 20, 645–655, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00272-3>.
- [22] X. Song, V. De Ven SS, L. Liu, F.J. Wouda, H. Wang, P.B. Shull, Activities of Daily Living-Based Rehabilitation System for Arm and Hand Motor Function Retraining After Stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 30, 621-631, 2022. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3156387>.
- [23] K.M. Triandafilou, D. Tsoupikova, A.J. Barry, Development of a 3D, networked multi-user virtual reality environment for home therapy after stroke. *J NeuroEngineering Rehabil*, 15, 88, 2018. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0429-0>.
- [24] A. Raheimi, N.A.C. Zakaria, Integration of Flex Sensor into Wrist Exoskeleton for Rehabilitation of Stroke Patient. *Basic Engineering Procedia*, 1, 1, 48-57, 2020.
- [25] Y.R. Garda et al, Flex Sensor Based Biofeedback Monitoring for Post-Stroke Fingers Myopathy Patients. *J. Phys. Conf. Ser.* 1007, 012069, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1007/1/012069>.





Üniversite toplu kullanım alanlarında iç ortam hava kalitesinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi

Indoor air quality in university public use areas evaluation in terms of occupational health and safety

Yeşim Yılmaz¹ , Ayşegül Bayın Sariahmetoğlu^{2,*} 

^{1,2} İstanbul Teknik Üniversitesi, İşyeri Sağlık ve Güvenlik Birimi Koordinatörlüğü, 34467, Maslak-Sarıyer, İstanbul Türkiye

Öz

Üniversite çalışanları ve öğrenciler yaşamlarının büyük bir bölümünü kapalı ortamlarda geçirmekte ve bu ortamlarda bulunan hava kirleticilerine maruz kalmaktadırlar. Bir devlet üniversitesinde yapılan bu çalışmada, ders çalışma, yemek yeme ve sosyal aktivitede bulunma gibi farklı aktivitelerin yapıldığı alanlarda, iç ortam hava kalitesi (İOHK) parametrelerinden sıcaklık, nem ve CO₂ konsantrasyonu ölçümleri yapılmış ve sonuçları analiz edilmiştir. Farklı havalandırma tesisatlarına sahip bu alanlardan alınan veriler sonucunda, İOHK parametrelerinden CO₂ konsantrasyonunu ile sıcaklığın kişi sayısı ve yapılan aktiviteye göre doğrusal değiştiği tespit edilmiştir. CO₂ konsantrasyon verilerinin yemek yeme alanlarında 1000 ppm üzerine çıktığı, ders çalışma aktivitesinin yapıldığı alanlarda havalandırma tesisatı olmasına rağmen kişi sayısının artmasıyla bu değerlerin 1000 ppm civarında olduğu görülmüştür. Nem ve sıcaklık değerlendirmesinde, ortamda havalandırma tesisatı bulunmasıyla birlikte, maruz kalınan değerlerin standart limit değerlerini aşmadığı görülmüştür. Sonuçlar, sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği bakışıyla irdelenmiş, mühendislik tedbirleri yönünden değerlendirme yapılarak çözüm önerileri sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: İç ortam hava kalitesi, Hasta bina sendromu, Salgın hastalık, Sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği

1 Giriş

İnsan yoğunluğunun fazla olduğu üniversite ortamlarında iç ortam hava kalitesi (İOHK), alanı kullanıcıların kapalı alanlarda çalışma, dinlenme, yaşama vb. faaliyetlerini yapmaları, bu ortamlarda sağlıklı ve verimli olmaları açısından önemlidir. İnsanların yaşamlarının yaklaşık %90'ını kapalı mekanlarda geçirmeleri hususu da göz önüne alındığında, İOHK'nın insanların yaşam konforunu etkileyen önemli bir kavram olduğu anlaşılmaktadır [1-3].

İOHK kavramı, kapalı bir alan içerisinde yaşayan insanların, iç mekan hava kalitesi, aydınlatma, termal konfor, akustik, içme suyu, ergonomi, elektromanyetik radyasyon vb. gibi parametrelere maruz kalmaları olarak açıklanabilir [4]. Çalışma hayatımızda İOHK parametrelerinin standart değerlerin üzerinde olması, günümüz insanların önemli

Abstract

University staff and students spend most of their lives indoors and are exposed to air pollutants in these environments. In this study conducted at a state university, temperature, humidity and CO₂ concentration measurements were made from indoor air quality (IAQ) parameters and the results were analyzed in areas where different activities such as study, eating and social activities are carried out. As a result of the data obtained from these areas with different ventilation installations, it has been determined that the CO₂ concentration and temperature, which are among the IOHK parameters, vary linearly according to the number of people and the activity. CO₂ concentration data was found to exceed 1000 ppm in dining areas, and although there is ventilation in the areas where study activities are carried out, these values were observed to be around 1000 ppm as the number of people increased. In the humidity and temperature evaluation, it was observed that the exposure values did not exceed the standard limit values, even though there was a ventilation system in the environment. The results were examined from the perspective of sustainable occupational health and safety, and solutions were presented by evaluating in terms of engineering measures.

Keywords: Indoor air quality, Sick building syndrome, Epidemic, Sustainable occupational health and safety

sağlık konularından biri haline gelmiştir. Öyle ki 1970'li yıllardan itibaren çok sık duyduğumuz "Hasta Bina Sendromu" (Sick Building Syndrome-SBS), bina kaynaklı hastalıkların, okullarda öğrenim performansının ve ofis ortamlarında çalışanların verimliliklerinin azalması gibi sağlık ve verimlilik sorunlarını beraberinde getirmektedir. [5, 6]. Bu sendromun sonucunda, iş ile ilişkili olarak kapalı ortamlarda bulunan kişilerin cilt, solunum sistemi, mukoz membran şikayetleri ile baş ağrısı, halsizlik ve konsantrasyon bozukluğu yaşadıkları tespit edilmiştir [7].

İş sağlığı ve güvenliği açısından İOHK parametrelerinin üniversite ortamlarında değerlendirildiği ve literatüre kazandırılan çalışma sayısı çok azdır. Ülkemizde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının ana çerçevesini 6331 Sayılı İş Sağlığı Ve Güvenliği Kanunu belirlemektedir [8]. İlgili

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aysegbayin@itu.edu.tr

Geliş / Received: 13.06.2023 Kabul / Accepted: 22.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1313830

kanun, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının yürütülmesi amacıyla yapılması gereken işlemleri belirtmesinin yanı sıra, çalışanların ve işverenlerin yasal hak ve sorumluluklarını belirlemede, uyulması gereken hususların göz ardı edilmesi ya da uyulmaması halinde idari ceza uygulamalarını bünyesinde barındırmaktadır. Bir çalışma ortamında öncelikli olarak yapılması gereken tehlike ve risklerin belirlenmesi amacıyla oluşturulan risk değerlendirme dokümantasyonu sürecinde, çalışma ortamında yapılacak iş hijyen ölçümlerinden İOHK parametrelerinin bu süreçte belirlenmesi, ortamda bulunan kişilerin bu etkenlere maruziyet seviyelerinin saptanması, sürekli iyileştirmelerin sağlanması amacıyla kullanılan havalandırma tesisatlarının yıllık periyodik kontrollerinin yapılması önemli hususlardır [9-11].

Uluslararası ve ulusal literatürde, İOHK parametrelerinden sıcaklık, nem ve CO₂ konsantrasyonu değerlerinden elde edilen verilerin kabul edilebilir İOHK parametrelerine göre irdelendiği çalışmalar mevcuttur. Özellikle dünyamızda son yıllarda yaşanan COVID-19 salgın sürecinde, İOHK daha önemli hale gelmiş, çalışan sağlığının korunmasına yönelik alınabilecek önlemler çerçevesinde, önceliklendirilen İOHK parametrelerinde değişikliklere gidilmeye başlanmıştır. Ortam sıcaklık ve nem değerleri değiştirilerek ortamın CO₂ konsantrasyon değişimi incelenmeye başlanmıştır. Araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin yapıldığı üniversite ortamlarında, iç ortam havasında biyolojik, kimyasal vb. maddelerin varlığından dolayı, İOHK parametrelerine daha fazla önem verilmesi gerektiği, bu parametrelerin hem çalışanları hem de üniversite öğrencilerini doğrudan etkilediği unutulmamalıdır.

Kapalı alanlarda çok sayıda hava kirleticisi bulunmaktadır. Bu hava kirleticilerinin tipleri ve ortamdaki miktarları, binanın konumuna, aynı bina içindeki odadan odaya ve ortamda gerçekleşen faaliyetlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. İnsan etkinliklerinden doğrudan etkilenen ve en önemli kaynağı canlıların solunumu olan CO₂, renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan bir gazdır. ASHRAE 62.1-2022 ve ASHRAE 62.2-2022 standartlarında tanımlanan verilere göre CO₂ gazı iç ortam havasında 1000 ppm ve altında ise iç ortam havası normal kabul edilmektedir. Dış ortam havasındaki miktarı ise 350 (678 mg/m³) ve 400 ppm (775 mg/m³) arasında değişmektedir [12,13].

İOHK açısından diğer önemli parametreler olan ortamın sıcaklık ve nem değerleri, kişilerin buldukları alanda ısı konforunu etkileyen özelliklerdir. Bir iç ortamda ASHRAE 55-2020 ve ISO 773 standartlarına göre kapalı alanlarda sıcaklık değerlerinin 20-24°C civarında tutulması, nemin ise %25-45 aralığında olması gerekmektedir [14-16]. Dolayısıyla, kapalı alanlarda kabul edilebilir sıcaklık ve nem değerlerini sağlamak için ortam havalandırmasının mekanik sistemli ve etkin seviyede olması beklenmektedir.

ASHRAE 62.2-2022 standardında iç ortam hava kalitesi, 4 farklı ortam değerlendirilmesine göre sınıflandırılmıştır. Bu standarda göre uygun hava kalitesi ortamları oluşturulmak isteniyorsa, havalandırma sistemlerinin türü, bu sistemlerin ortamdaki havayı nasıl sirküle edeceği ya da

ortamdan uzaklaştırılacağı, iç ortam havasının hangi şartlarda başka alanda kullanılabileceği gibi teknik düzenlemeler belirtilmektedir [12].

İtalya'da iki orta öğretim kurumuna ait sınıflarda CO₂ konsantrasyonu açısından yapılan çalışmada, konsantrasyon düzeylerinin doğal ve mekanik havalandırma sistemlerine göre değiştiği açıkça saptanmıştır. Doğal olarak havalandırılan ve tipik doluluk oranına sahip sınıflarda, asemptomatik bir bireyin varlığı durumunda, diğer bireylerin bu durumdan hemen etkilendiği, mekanik havalandırma sistemine sahip alanlarda ise bu etkileşim durumunun azaldığı sonucuna varılmıştır [17-19]. Ülkemizde yapılan bir diğer çalışmada, bir devlet üniversitesinde bulunan yemekhane ve kantin alanlarında İOHK parametrelerinden sıcaklık, nem ve CO₂ konsantrasyonu ölçümleri değerlendirmesi yapılmıştır. Doğal havalandırma sistemine sahip bu alanların İOHK verilerinin kişi yoğunluğuna bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği saptanmıştır [20].

Okullarda İOHK'nın nem, sıcaklık ve CO₂ konsantrasyonları konusunda yapılan çalışmaların sonucunda, öğrencilerin nefes alıp verme hızlarına ve ortam hava kalitesine bağlı olarak bilişsel performanslarının etkilendiği çalışmalar da mevcuttur [21]. Ayrıca, İOHK'nın bu parametrelerinin standart limit değerleri aşmasına bağlı olarak, öğrencilerin okul devamsızlıklarının arttığı ve öğrenme performanslarının olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir [22-25].

Son yıllarda İOHK parametrelerinden özellikle CO₂ konsantrasyonunun miktarının belirlenip değerlendirildiği çalışmalarda, doğal havalandırmaya sahip derslik ortamlarında kış aylarında konsantrasyon miktarlarının standart limit değerlerini aştığı ve mekanik havalandırma sistemlerine geçişlerin önerildiği görülmektedir [26-28]. Bazı çalışmalarda, yine doğal havalandırma sistemine sahip ortamlarda bulunan kişilerin dersliklerde sürekli aktivitelerine devam etmeleri halinde, ortam CO₂ konsantrasyonunun sürekli arttığı ve 4000 ppm limitlerine ulaştığı tespit edilmiştir. [29]. Toronto (Kanada)'da kurumsal bir binada yapılan bir diğer çalışmada da sıcaklık ile CO₂ konsantrasyonu arasındaki ilişki değerlendirilmiş, mekanik havalandırma sistemine sahip alanlarda, sıcaklığın 23°C'nin altına indirilmesiyle CO₂ konsantrasyonunun maksimum 900 ppm ile eşik değer olan 1000 ppm'in altında tutmayı başardıkları görülmüştür. [30-32]. Bu çalışmalarda, ortama sabitlenen cihazlardan sürekli bulunan verilerle İOHK değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu çalışmada, bir devlet üniversitesinde doğal ve mekanik havalandırma sistemine sahip yemekhane servis alanında, kütüphanede ve merkezi derslik alanlarında İOHK parametrelerinden nem, sıcaklık ve CO₂ konsantrasyonunun tespitleri yapılmıştır. Elde edilen veriler, üniversite ortamlarında iş sağlığı ve güvenliği bakış açısıyla sürdürülebilir yaşam ortamları oluşturulabilmesi yönünden değerlendirilmiş, benzer kullanım alanlarına sahip kullanıcılara bilimsel veri kaynağı oluşturulması amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

İnsan yoğunluğunun fazla olduğu üniversite ortamlarında, İOHK parametrelerinden olan CO₂ konsantrasyonu, sıcaklık ve nem verilerinin incelendiği bu çalışmada, doğal ve mekanik havalandırma sistemlerine sahip farklı çalışma alanları tercih edilerek, elde edilen verilerin iç hava kalitesi ile havalandırma sistemlerine göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonbahar ve kış aylarında alınan verilerle, iklim şartlarına göre irdeleme gerçekleştirilmiştir. İOHK'nin CO₂ konsantrasyonu, sıcaklık ve nem parametrelerine göre verilerinin alındığı cihaz, CO₂ konsantrasyonu için ayrı proba sahip, portatif, lazerle anlık veri alan, Extech marka SD800 Dataloggeri model bir cihazdır. Yemekhane Servis (yemek yeme salonu) alanına, kütüphanede sessiz ders çalışma bölgesine ve toplu kullanım alanlarından olan Merkezi Derslik-A'ya yerleştirilen cihazlar, sabit tek bir noktadan veri almışlardır. Belirlenen alanlara sabitlenen cihazlardan 60 sn süreyle sürekli veriler alınmış ve sonuçları, standartlarda belirtilen limit değerlere göre değerlendirilmiştir.

İOHK parametrelerinden olan CO₂ konsantrasyonu, sıcaklık ve nem değerleri, ortamın doğal ya da mekanik havalandırma sistemi türüne göre değişmektedir [6, 33]. Tablo 1.'de bazı ortamlara göre kategorize edilen ortam hava kalite sınıfları ve bu mevcut ortamların havalanmasının sirküle edilip edilemeyeceği bilgilerini içeren özet tablo içeriği sunulmuştur. Bu bilgilerle çalışma ortamında mekanik havalandırma sistemi kurulmak isteniyorsa, ortam koşullarına göre nasıl sistem kurulması gerektiği belirtilmektedir [12].

Tablo 1. Bazı hava kalite sınıfları ve hava kalitesinin sirküle ve transfer edilip edilemeyeceğini içeren özet bilgileri [12].

Ortam	Hava kalite sınıfı	Havanın sirküle edilip edilemeyeceği
Derslik/Sınıf	Sınıf 1	Ortam havasına yeniden sirküle ve transfer edilebilir.
Laboratuvar	Sınıf 2	Kendi sınıfında sirküle ve transfer edilebilir. Sınıf 1'e gönderilemez Sınıf 3 ve 4'e gönderilebilir.
Mutfak/ Restaurant	Sınıf 2	Kendi sınıfında sirküle ve transfer edilebilir Sınıf 1'e gönderilemez Sınıf 3 ve 4'e gönderilebilir.
Tehlikeli maddelerin kullanıldığı alanlar	Sınıf 3	Kendi sınıfında sirküle ve transfer edilebilir. Başka sınıf kategorilerine gönderilemez.
Mutfak davlumbazları	Sınıf 4	Sirküle ve transfer edilmez
Çeker ocaklar	Sınıf 4	Sirküle ve transfer edilmez

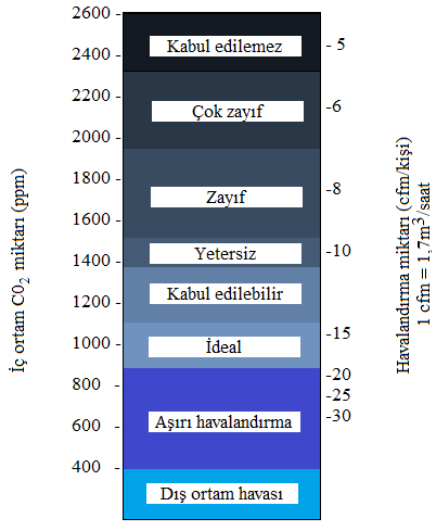
Yapılan bu çalışmada, cihaz yerleştirilen alanlarda, hava kalite sınıflarına uygun iç ortam hava kalitesi değerlendirilmesi de yapılmıştır. İç ortam yemek yeme alanında mekanik havalandırma sistemi yapılmak isteniyorsa, ASHRAE 62.1-2022 standardına göre tesisat Sınıf-2'ye göre kurulmalı ve bu tesisattan diğer bölgelere hava sirküle edilecekse, havalandırma tesisat düzeni bu sınıf türünün şartlarına göre düzenlenmelidir. Yemek üretiminin olduğu alanlarda hava kalite sınıfının Sınıf-3 düzeyinde olması ve havalandırma sisteminin ortam havasını alıp filtreleyerek ortamdaki uzaklaştırması, herhangi bir bölgeye iletilmemesi gerekmektedir.

Tablo 2.'de, bu çalışma kapsamında cihaz konumlandırılan alanlarda, mekanik havalandırma sisteminin olup olmadığı ve havalandırma tesisatının hangi hava kalite sınıfına göre kurulduğu bilgisi paylaşılmıştır. Çalışmanın yapıldığı Merkezi Derslik-A bölgesinde kantin bulunmaktadır. Yemekhane servis bölgesinde yemek dağıtımı yapılırken, yemekhane üretim alanına geçiş söz konusu değildir. Ancak yemekhane üretim ve servis bölgelerinde temizlik yapılırken, alanlar arası ara bölme kapıları açılmaktadır. Kütüphane ders çalışma bölgesine yerleştirilen alanda herhangi bir yeme-içme faaliyeti yoktur.

Tablo 2. Ortam ölçüm cihazı yerleştirilen alanlardaki mekanik havalandırma sistemi varlığı ve şekli

Konum	Havalandırma Sistemi	Havalandırma Sistemi Türü	Hava kalite sınıfı
Yemekhane Servis	Yok-Doğal	-	-
Kütüphane	Var-Mekanik	Mekanik Emiş+Mekanik Beslemeli	Sınıf 1
Merkezi Derslik-A	Var-Mekanik	Mekanik Emiş+Doğal Beslemeli	Sınıf 1

İOHK parametrelerinden olan ortamın CO₂ konsantrasyonu, hava kalitesi için önemli bir parametredir. Kapalı ortamlardaki en etkili CO₂ üreticisi insanlardır. Eğer bir mahaldeki insan sayısı ikiye katlanırsa CO₂ miktarı da artan insan sayısı ile doğru orantılı olarak ikiye katlanır. Eğer mahaldeki insan sayısı azalır, CO₂ miktarı da buna paralel olarak azalmaktadır [34]. Akademik çalışmaların yapıldığı üniversite ortamlarında kapalı alan kullanıcılarının, iç mekanlarda sağlıklı bir ortamda vakit geçirmeleri ve aktivitelerini yapmaları açısından İOHK'nin CO₂ konsantrasyonu, uluslararası standartlarda belirtilen limit değerlerde olması gerekmektedir. Kapalı bir ortamda CO₂ konsantrasyonu ile ortamın havalandırması arasındaki ilişki Şekil 1.'de gösterilmektedir. Kapalı ortamın, alan kullanıcılarının aktivitelerine göre uygun havalandırma sistemine sahip olması beklenmektedir [33, 34]. Havalandırma miktarının ortamdaki CO₂ konsantrasyonuna bağlı olarak değişimini gösteren şekilde, CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm değerinde ve kişi başı düşen hava miktarının saatte 15 m³ olması halinde ideal iç ortam hava şartlarının oluştuğu görülmektedir.



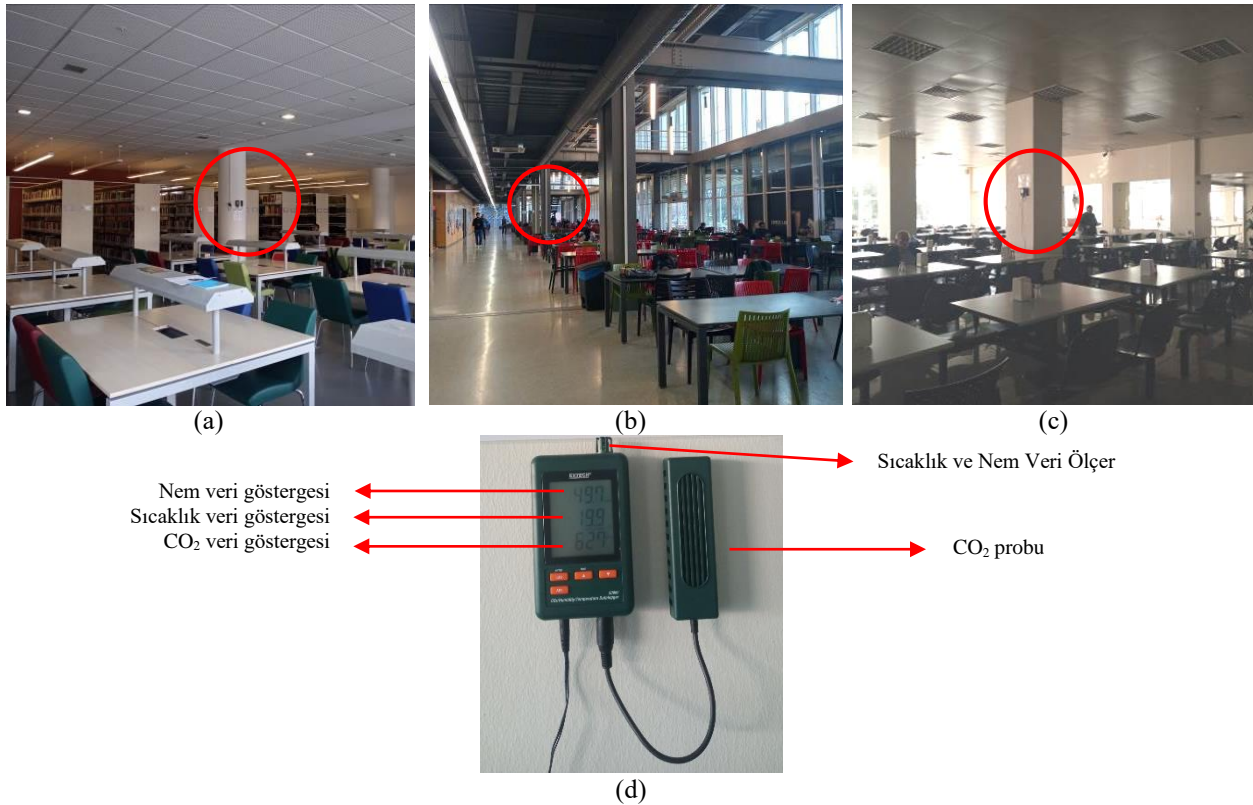
Şekil 1. CO₂ konsantrasyonu ve havalandırma miktarı arasındaki ilişki [33].

6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve mevzuatlarında kişi başına düşen hava miktarı bilgisi net olarak yoktur. Ulusal mevzuatımızdan olan ve günümüzde kullanılmayan İşçi Sağlığı ve Güvenliği Tüzüğü'nde çalışanlarda kişi başına düşen hava miktarı 10 m³ iken, koğuşlarda bu miktar 12 m³'dür [35].

Ortam ölçüm cihazları ölçüm yapılacak hacim duvarına veya kolonuna monte edilmiştir. Montaj alanı seçiminde ölçüm alınacak bölgedeki kişi sayısının en yoğun olabileceği bölgeler tercih edilmiştir. Cihazda ek olarak bulunan CO₂ probu, cihaz yanına ve cihazla aynı yükseklikte olacak şekilde konumlandırılmıştır. Tablo 3.'te cihazların konumlandırıldıkları bölge ve hacim bilgileri ile cihazdan veri alınırken aynı anda ortamda bulunan ortalama kişi sayı bilgileri yer almaktadır. Şekil 2.'de cihazların konumlandırıldıkları bölgeler ve kullanılan cihazın görseli yer almaktadır. Ölçüm alındığı anda ortamda bulunan maksimum kişi sayısı yönünden yapılan değerlendirmede, kişi başına düşen ortalama m³ hava miktarı hesaplanmıştır.

Tablo 3. Ortam ölçüm cihazlarının konumlandırılma bölgelerinin genel bilgileri

Konum	Yer	Alan Hacim Bilgileri (m ³ -enxboyxyyükseklik)	Aynı Anda Alanda Bulunan Ortalama Kişi Sayısı	Kişi Başına Düşen Yaklaşık Hava Miktarı-m ³
Yemekhane Servis	Giriş - Salon 2	787.5 m ³ (15x15x3,5)	252	3.1 m ³
Kütüphane	Giriş - Büyük Salon	504 m ³ (12x14x3)	80	6.3 m ³
Merkezi Derslik-A	Giriş	1400 m ³ ((20x5x4)+(20x5x10))	200	7 m ³



Şekil 2. Ortam ölçüm cihazının konumlandırılma görselleri ile cihazın gösterge görseli (a) kütüphane (b) merkezi derslik-A (c) yemekhane servis (d) cihaz ve göstergeleri

İOHK'nin iklimlendirme şartlarına ve ortamda bulunan kişi sayısına bağlı olarak değiştiği, insan yoğunluğunun fazla olduğu alanlarda havalandırma sisteminin teknik yönden seçiminin de önemli olduğu, yapılan çalışmalarla da görülmüştür [33, 36, 37].

3 Bulgular ve tartışma

Bir devlet üniversitesinde, kullanım amacı ve kullanıcı yükü farklı olan üç bölgede alınan verilerle İOHK'nin normal çalışma koşullarının değerlendirildiği bu çalışmada, hasta bina sendromu gibi İOHK'ye bağlı olan parametrelerin iş sağlığı ve güvenliği bakışıyla irdelemesi yapılmıştır. Alınan verilere istinaden iç ortamda alınması gereken tedbirlere yönelik bilimsel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

En genel belirtileriyle baş ağrısı, yorgunluk ve konsantrasyon eksikliği olarak bildiğimiz hasta bina sendromu, bu çalışmada sıcaklık, nem ve CO₂ konsantrasyonu parametreleri yönünden incelenmiştir. Kapalı ortamlarda en fazla vakit geçirilen sonbahar ve kış aylarında, bu parametrelerin verileri alınarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4.'te Kütüphane, Merkezi Derslik-A ve Yemekhane Servis alanlarında, Eylül 2022 – Mart 2023 aylarında tespit edilen en yüksek nem değerleri ile tespit yapıldığı aynı güne ait en düşük nem değerleri gösterilmiştir.

Aylık olarak en yüksek İOHK parametrelerinin alınarak değerlendirildiği verilerde, kütüphanede iç ortam nem değerinin genellikle öğlene kadar en yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. Cihazın yerleştirildiği salon, sessiz ders çalışıldığı ve konuşmanın gerçekleşmediği bir iç mekandır. Sonuçlardan, iç ortamda nem değerinin genellikle %40'ı aştığı ve uluslararası kabul edilen nem değerinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Kütüphane 7x24 sürekli kullanılan olan bir alandır. Öğrencilerin normal öğrenim sürecinden

sonra kütüphanede ders çalıştıkları sürekli gözlenmiştir. Nem değerlerinin, en yüksek veri alınan gündeki en düşük olduğu zaman aralıkları 12:00 – 20:00 saatleri arasındadır. Genel nem verileri incelendiğinde sabah saatlerinde ortam nem değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Kütüphanede mekanik havalandırma tesisatı mevcuttur ve sürekli çalışmaktadır. Kütüphane mekanik havalandırma tesisatının filtre değişimleri ve kabin temizlikleri yıllık yapılmaktadır. Havalandırma tesisatı kabinleri bodrum katta olup, kirli hava, filtrasyon işleminden sonra atmosfere verilmekte, atmosferden de temiz hava alınarak filtrasyon kabinlerine gelmektedir. Havalandırma tesisatının hem kirli hava çıkış hem de temiz hava giriş kabinleri filtrelerle temizlenmektedir.

Merkezi Derslik-A binasında bulunan mekanik havalandırma tesisatının 6 (altı) aylık filtre değişimleri yapılmaktadır. Havalandırma tesisatı kabinleri her katta konumlandırılmıştır. Kabinlerden çıkan kirli hava ile temiz hava kabinlerine gelen hava, binanın çatısında bulunan hava kanallarından ana bacalara bağlanmaktadır. Kirli hava filtrasyon işleminden sonra atmosfere verilmekte, atmosferden de temiz hava alınarak filtrasyon kabinlerine gelmektedir. Mekanik havalandırma sistemi ilk bahar, yaz ve sonbahar aylarında çalıştırılmamaktadır. Cihazın yerleştirildiği Merkezi Derslik-A giriş katından alınan verilerin %40 nem değerini genellikle aştığı ve uluslararası kabul edilen nem değerinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Bu alan 7x24 aktif olan bir alandır. Öğrencilerin eğitim ve öğretim faaliyetinden sonra saat 17:30'tan itibaren alanda grup halinde ders çalıştıkları gözlenmiştir. Öğrencilerin büyük çoğunluğu gece yarısını hemen geçtikten sonra alandan ayrılmaktadır. İç ortam nem değerinin genellikle öğlene kadar en yüksek seviyelerde; gece yarısından sonra da en düşük seviyelerde olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Nem değerlerinin en yüksek olduğu tarihte alınan en yüksek ve en düşük veriler

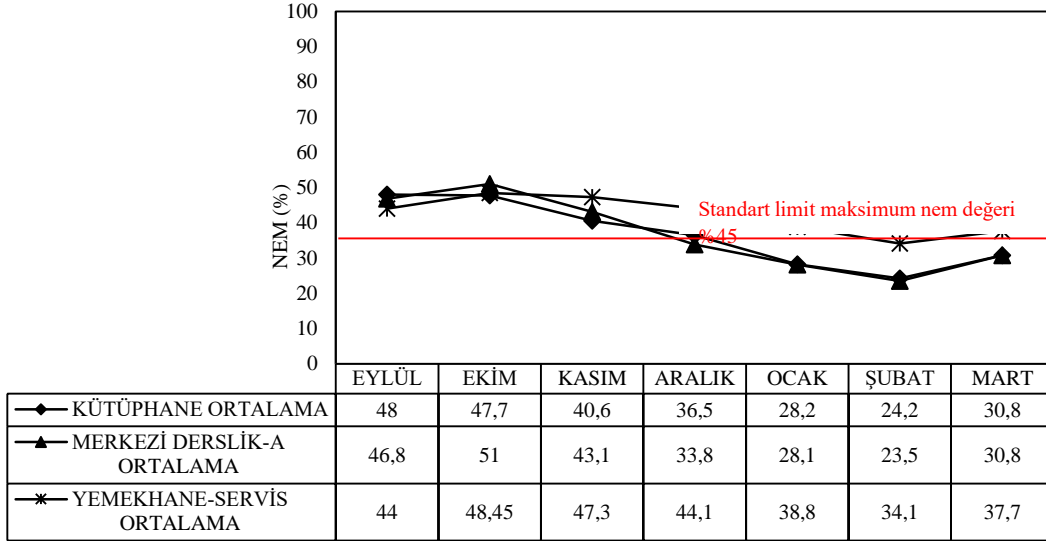
Konum	Veri Alınan Aylar	En Yüksek Nem Veri Tarihi	En Yüksek Nem Veri Değeri (%)	Saati	Aynı Gün En Düşük Nem Veri Değeri (%)	Saati
Kütüphane	Eylül	29.09.2022	64	04:08	49.5	18:15
	Ekim	1.10.2022	60.9	08:44	43.8	18:04
	Kasım	6.11.2022	54.9	23:25	35.2	12:44
	Aralık	16.12.2022	54.7	09:32	43.1	13:50
	Ocak	6.01.2023	37.7	12:11	25.8	15:54
	Şubat	1.02.2023	40.6	09:13	21.7	23:24
	Mart	26.03.2023	41.2	15:22	30.9	03:48
Merkezi Derslik-A	Eylül	18.09.2022	67.4	07:57	39.1	21:13
	Ekim	2.10.2022	67.9	12:20	44.1	02:53
	Kasım	3.11.2022	63.1	10:31	46.8	00:11
	Aralık	1.12.2022	57.2	19:05	43.7	04:28
	Ocak	2.01.2023	40.4	11:10	23.9	15:44
	Şubat	28.02.2023	41	13:40	23	02:20
	Mart	26.03.2023	47	14:17	22.6	00:12
Yemekhane Servis	Eylül	28.09.2022	69.1	08:11	48.3	00:15
	Ekim	16.10.2022	66.7	13:09	50.7	19:23
	Kasım	3.11.2022	65.2	11:36	50.1	00:01
	Aralık	15.12.2022	64.3	17:34	41.5	01:50
	Ocak	12.01.2023	55.3	09:14	39.8	14:36
	Şubat	2.02.2023	56	07:43	23.9	14:30
	Mart	26.03.2023	55	13:41	38.7	00:00

Yemekhane servis alanında mekanik havalandırma tesisatı yoktur. Doğal havalandırma ile havalandırma yapılmaktadır. Yemek servisi öğlen 11:30 – 14:00, akşam da 17:00 – 19:00 saatleri arasında yapılmaktadır. Elde edilen nem veri değerleri sonuçlarından, ortam nem değerinin uluslararası standartları çok fazla aştığı ve en düşük ortam nem değerinin %55 olduğu tespit edilmiştir. Sabah saatlerinde nem değerlerinin yükselmesinin sebebinin, yemekhane üretim kısmının kapılarının açılması olduğu anlaşılmaktadır. Genel veriler incelendiğinde, akşam yemek yeme saatlerinde nem değerlerinin gün içerisindeki en yüksek rakamları gördüğü, en düşük nem değerlerinin ise binanın kullanılmadığı gece yarısından sonraki saatlerde olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3.'te nem verileri, cihaz yerleştirilen alanlarda aylık ortalamaları alınarak gösterilmiştir. Aylık ortalamaların

Eylül, Ekim ve Kasım 2022 aylarında uluslararası standart limit değerleri genellikle aştığı; kış aylarında limit değerlerin altında kaldığı görülmüştür. Ocak 2023 ayındaki değerlerin düşüşünün sebebi, akademik takvime bağlı olarak final sınavlarının tamamlanmasıyla birlikte öğrencilerin alanları boşaltmalarıdır.

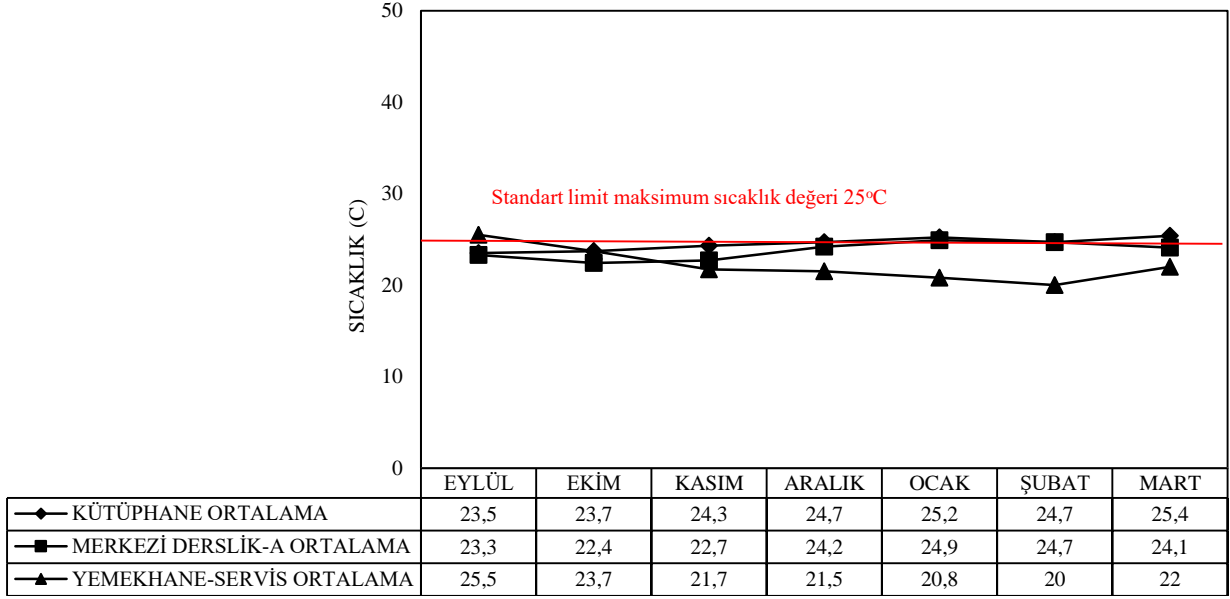
6 Şubat 2023 tarihinde ülkemizde yaşanan ve 11 ilimizi etkileyen deprem felaketi nedeniyle, bu tarihten sonra alınan veri değerlerinde önceki aylara göre düşüş gözlenmiştir. Çalışmanın yapıldığı üniversitede akademik bahar yarıyılı başlangıcı 6 Şubat 2023'tür. Deprem felaketi nedeniyle bu tarihten itibaren dersler uzaktan yapılmıştır. Çalışmanın yapıldığı üniversitede akademik çalışmaların lisansüstü seviyede devam etmesi sebebiyle, bu tarihten itibaren yerleşke, lisansüstü öğrenciler ve personeller tarafından aktif halde kullanılmıştır.



Şekil 3. Nem değerlerinin aylık ortalama veri grafiği

Tablo 5. Sıcaklık değerlerinin en yüksek olduğu tarihte alınan en yüksek ve en düşük veriler

Konum	Veri Alınan Aylar	En Yüksek Sıcaklık Veri Tarihi	En Yüksek Sıcaklık Veri Değeri (%)	Saati	Aynı Gün En Düşük Sıcaklık Veri Değeri (%)	Saati
Kütüphane	Eylül	30.09.2022	26.6	16:47	24.2	16:15
	Ekim	1.10.2022	26.8	16:25	25	07:14
	Kasım	21.11.2022	27.2	14:17	25.8	07:27
	Aralık	29.12.2022	26.6	15:40	25	09:13
	Ocak	18.01.2023	26.7	14:54	25.4	01:33
	Şubat	22.02.2023	27.7	13:39	26.2	21:49
	Mart	8.03.2023	27.3	16:59	24.9	03:50
Merkezi Derslik-A	Eylül	16.09.2022	26.4	13:02	24.2	21:13
	Ekim	2.10.2022	24.7	09:42	21.8	23:53
	Kasım	18.11.2022	26.6	14:45	23.8	00:00
	Aralık	25.12.2022	28.9	13:48	23.3	23:36
	Ocak	18.01.2023	28.9	05:43	25.6	23:24
	Şubat	19.02.2023	28.9	13:19	27.4	18:26
Yemekhane Servis	Mart	05.03.2023	28.3	11:36	23.7	23:50
	Eylül	18.09.2022	29.1	11:34	26.8	05:36
	Ekim	01.10.2022	28	10:46	26	05:58
	Kasım	21.11.2022	25.3	12:58	22.3	05:00
	Aralık	30.12.2022	25.8	14:23	21.3	07:44
	Ocak	27.01.2023	25.7	19:09	20.1	07:49
	Şubat	22.02.2023	26.2	13:46	21	07:31
Mart	09.03.2023	26.1	11:33	21.8	07:50	



Şekil 4. Sıcaklık verilerinin aylık ortalama veri grafiği

Tablo 5.'te cihaz yerleştirilen alanların Eylül 2022 – Mart 2023 aylarında tespit edilen en yüksek sıcaklık değerleri ile tespitin yapıldığı aynı güne ait en düşük sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Alınan veri sonuçlarına göre en yüksek sıcaklık değerlerinin standartlarda belirtilen limit değerler olan 24-25°C sıcaklık değerlerini aştığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.'te sıcaklık verilerinin, aylık ortalamaları alınarak oluşturulan grafik gösterilmiştir. Aylık ortalamaların genellikle uluslararası standart limit değerleri içerisinde yaklaşık 24°C civarlarında kaldığı görülmüştür. Kış aylarında ısıtma yapılmasından dolayı sıcaklık değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ocak 2023 ayındaki değerlerin düşüşünün sebebi, akademik takvime bağlı olarak final sınavlarının tamamlanmasıyla birlikte öğrencilerin alanları boşaltmalarıdır.

Sıcaklık değerlerinin, en yüksek veri alınan gündeki zaman aralıkları 12:00 – 17:00 saatleri arasındadır. Genel sıcaklık verileri incelendiğinde sabah ve gece saatlerinde ortam sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Kütüphaneden alınan sıcaklık verilerinin 15:00 – 17:00 saatleri arasında en yüksek değerleri gördüğü, genel verilerin incelemesinde de 18:00 – 22:00 saatleri arasında ortam sıcaklığının 25°C'den yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kütüphanenin ısıtma sistemleri, merkezi ısıtma sistemli, merkezi havalandırma sistemli ve elektrik kaynaklı olarak üç farklı türde yapılmaktadır. Elektrik kaynaklı ısıtmalarda konvektörler kullanılmaktadır. Merkezi havalandırma ve merkezi ısıtma sistemine bağlı ısıtmalarda sıcaklık, kış aylarında 24-25°C'lerde sabitlenmektedir. Yaz aylarında sadece merkezi havalandırma sistemi kullanılmakta ve sıcaklık 24°C'de sabitlenerek iklimlendirme yapılmaktadır. Yaz ve kış aylarında merkezi havalandırma sistemi sürekli çalışmaktadır. Merkezi ısıtma sistemi ile konvektörle ısıtma sadece kış aylarında kullanılmaktadır.

Merkezi Derslik-A binasında ısıtma sadece kış aylarında, merkezi havalandırma ile fan coil kullanılarak

yapılmaktadır. İlk bahar, yaz ve sonbahar aylarında merkezi havalandırma çalıştırılmadığından dolayı sıcak havalarda, alanlarda bulunan salon tipi klimalarla iklimlendirme yapılmaktadır. Merkezi Derslik-A binasından alınan sıcaklık verilerinin 11:00 – 14:00 saatleri arasında en yüksek değerleri gördüğü, tüm verilerin incelenmesinde bu saatler arasında sıcaklık değerinin ortam sıcaklığının 25°C'den yüksek olduğu tespit edilmiştir. Merkezi Derslik-A binasında cihazın konumlandırıldığı bölgeye yakın kantin bulunmaktadır. Kantinde hızlı hazırlanan yemek pişirme ve hazırlama işlemleri yapılmaktadır. Sıcaklık değerlerinin bu saatlerde yüksek olmasının sebebi, ortamda bulunan öğrenci sayısına bağlı olarak kantinin de etkin biçimde kullanılmasıdır.

Yemekhane servis alanında, öğlen yemek yeme saatlerinde, sıcaklık değerlerinin en yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Verilerin genel incelemesinde de sonbahar aylarında ve akşam yemek yeme saatlerinde sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu dönemde ve özellikle 18:00 – 19:00 saatleri arasında sıcaklıkların 27°C civarında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.'da CO₂ konsantrasyon değerlerinin en yüksek olduğu tarihte alınan en yüksek ve en düşük değerler listelenmiştir. Aylık ortalamaların genellikle uluslararası standart limit değerleri içerisinde, fakat sınır değerlere yakın olduğu görülmüştür.

Kütüphaneden alınan CO₂ konsantrasyon verilerinin değerlendirilmesinde, ortamda bulunan kişi sayısına bağlı olarak değerlerin belirgin şekilde arttığı, özellikle akademik takvime göre final sınavlarından önce Aralık 2022 ayının sonlarına doğru bu değerlerin standart limit değerlerin üzerinde çıktığı tespit edilmiştir. En yüksek verilerin akşam 18:30 – 21:30 saatleri arasında, en düşük değerlerin de genellikle sabahın ilk saatlerinde olduğu görülmüştür. Veri sonuçlarından havalandırma sisteminin kullanılmasına rağmen hem sıcaklık hem nem hem de CO₂ konsantrasyon değerlerinin standart limit değerlerini aştığı tespit edilmiştir.

Tablo 6. CO₂ konsantrasyon değerlerinin en yüksek olduğu tarihte alınan en yüksek ve en düşük veriler

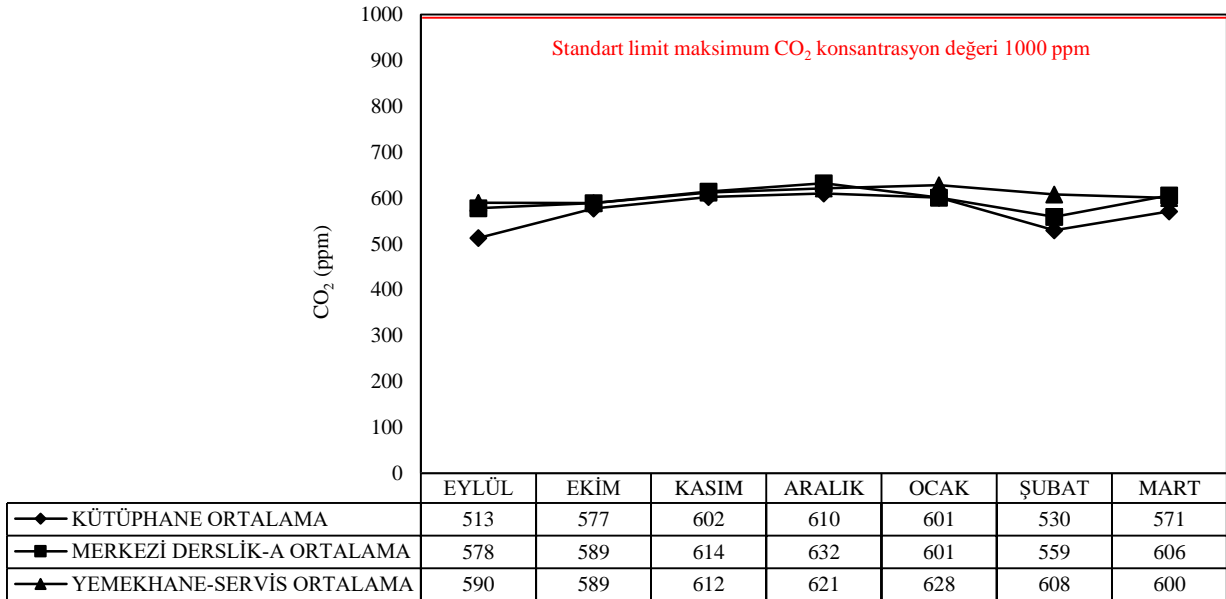
Konum	Veri Alınan Aylar	En Yüksek CO ₂ konsantrasyon Veri Tarihi	En Yüksek CO ₂ konsantrasyon Veri Değeri (%)	Saati	Aynı Gün En Düşük CO ₂ konsantrasyon Veri Değeri (%)	Saati
Kütüphane	Eylül	28.09.2022	1046	19:58	438	02:59
	Ekim	12.10.2022	928	19:28	460	04:19
	Kasım	14.11.2022	1034	18:21	469	05:43
	Aralık	29.12.2022	1325	17:16	608	00:00
	Ocak	3.01.2023	972	21:03	531	06:25
	Şubat	3.02.2023	840	08:53	458	03:06
	Mart	22.03.2023	839	19:49	456	07:08
Merkezi Derslik-A	Eylül	29.09.2022	1069	18:24	475	07:27
	Ekim	6.10.2022	982	19:38	559	11:53
	Kasım	8.11.2022	889	00:18	483	13:21
	Aralık	18.12.2022	1574	20:43	526	09:38
	Ocak	6.01.2023	863	19:50	531	07:13
	Şubat	7.02.2023	1045	22:57	493	06:24
	Mart	16.03.2023	931	19:37	557	07:44
Yemekhane Servis	Eylül	26.09.2022	1765	17:48	517	03:52
	Ekim	31.10.2022	1201	17:43	511	14:34
	Kasım	1.11.2022	1428	17:18	522	15:23
	Aralık	14.12.2022	1689	18:37	519	03:08
	Ocak	6.01.2023	1523	17:31	535	02:59
	Şubat	23.02.2023	1231	13:29	524	22:45
	Mart	27.03.2023	1359	19:54	522	17:28

Merkezi Derslik-A binasından alınan verilerde CO₂ konsantrasyon değerlerinin, kütüphanede alınan verilere benzer şekilde 18:30 – 21:30 saatleri arasında en yüksek değerleri gördüğü, tüm verilerin incelenmesinde bu saatler arasındaki akademik dönem içerisinde konsantrasyon değerlerinin hemen hemen 900 – 1100 ppm değerler arasında olduğu tespit edilmiştir. Merkezi Derslik-A binasında cihazın konumlandırıldığı bölgeye yakın kantinin bulunması da bu konsantrasyon değerlerine olumsuz etki ettiği anlaşılmaktadır.

Yemekhane servis alanında CO₂ konsantrasyon değerlerinin, akşam yemek yeme saatlerinde en yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Verilerin genel

incelemesinde 17:30 – 19:00 saatleri arasında konsantrasyon değerlerinin standart limit değerlerinin çok üzerinde olduğu tespit edilmiştir. En düşük konsantrasyon değerlerinin nem verilerinde olduğu gibi gece yarısından sonra olduğu görülmüştür.

Şekil 5.'te CO₂ konsantrasyon verilerinin, aylık ortalamaları alınarak oluşturulan grafik gösterilmiştir. Aylık ortalamaların genellikle uluslararası standart limit değerleri içerisinde yaklaşık 570 ppm dolaylarında kaldığı görülmüştür. Aylık alınan ortalama değerler ile günlük verilerin birbirini yansıtmadığı, CO₂ konsantrasyon verilerinin değerlendirilmesi hususunda ortalama değerlerin gerçeği yansıtan bir ölçüt olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5. CO₂ konsantrasyonu verilerinin aylık ortalama veri grafiği

Kişi başı m^3 hava miktarı, İOHK'nın cihaz yerleştirilerek değerlendirildiği alanlarda, kişi yoğunluğuna bağlı olarak azalmaktadır. Kişi başına düşen m^3 hava miktarının sınır değerde tutulması hususunda hiçbir alanda teknik bir sınırlandırma çalışması söz konusu değildir. Alanlar, öğrencilerin maksimum kişi sayısına bağlı olarak alanlardan yararlanma bakış açısıyla düzenlemiştir. Öğrencilerin akademik çalışma yapmaları ve bilimsel anlamda kendilerini geliştirmeleri önemli bir husustur. Ancak sonuçlardan, öğrencilerin ders çalışırken ya da yaşamsal faaliyetlerini sürdürürken, kaliteli bir iç ortam havasına sahip alanlarda bulunmadıkları anlaşılmaktadır.

Veri sonuçlarından, nem, sıcaklık ve CO_2 konsantrasyon değerlerinin birbirlerinden bağımsız olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Nem ve sıcaklık verilerinin ortalama alınan aylık verilerle günlük verilerin kıyaslamasında, benzer veri sonuçları verdiği; CO_2 konsantrasyon değerinin aylık ortalama verilerin günlük verileri yansıtmadığı tespit edilmiştir.

Sonuçlara göre, mekanik emiş ve mekanik beslemeli tesisata sahip alanlarda İOHK parametrelerinin genel olarak daha düzenli ve standart seyir halinde ilerlediği, ortamda bulunan kişi sayısının bu veri değerlerine etki ettiği ve iç ortam hava kalitesini standart limit değerlerini yükselttiği anlaşılmaktadır. Havalandırma tesisatı sistemine sahip olmayan yemekhane servis alanında iç ortam havasının belirgin olarak kişi sayısının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Ortam ölçüm verilerine göre İOHK'nin en kötü olduğu alanın, havalandırma tesisat sistemine sahip olmayan yemekhane servis alanında olduğu anlaşılmaktadır.

4 Sonuçlar

İOHK parametrelerinden nem, sıcaklık ve CO_2 konsantrasyonu verilerinin, bir devlet üniversitesine ait kapalı iç ortamlarda belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışma, sürdürülebilir iş sağlığı ve güvenliği kontrol önlemleri bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

Sonuçlarda, nem, sıcaklık ve CO_2 konsantrasyonu verilerinin, cihaz yerleştirilen kapalı iç mekanlarda havalandırma tesisatı varlığına bağlı olmadan kişi sayısının artmasıyla arttığı ve uluslararası standart limit değerlerini aştığı görülmüştür. Havalandırma tesisatı varlığının, kişi sayısına bağlı olarak havalandırma sistemine sahip olmayan alanlara kıyasla İOHK sonuçlarını olumlu yönde etkilediği, fakat uluslararası standart limit değerlerinin karşılanmasında ve iç ortam hava kalitesini sınırlandırmada etkin rol oynamadığı anlaşılmaktadır.

İş sağlığı ve güvenliği kontrol önlemlerinde mühendislik tedbirleri önceliklidir. İOHK yönünden iç ortam hava düzenlemesinde havalandırma tesisatlarının varlığı mühendislik tedbirlerinden biridir. Ancak sonuçlardan, bu tedbirin etkin olmadığı anlaşılmaktadır.

Kişi başına düşen m^3 hava miktarının kişi yoğunluğuna bağlı olarak azaldığı, ortamda bulunanların kaliteli bir iç ortam havasına sahip alanlarda bulunmadıkları sonucuna varılmıştır.

Kapalı ortamlarda kişi sayısına bağlı olarak İOHK parametrelerinden nem, sıcaklık ve CO_2 konsantrasyonu

değerlerini azaltmak ve kişi başına düşen m^3 hava miktarını artırmak için ilave teknik önlemler alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışma sonucunda,

✓ Havalandırma tesisatına sahip alanlarda İOHK parametrelerinden nem, sıcaklık ve CO_2 konsantrasyonu değerlerinin kişi sayısının artmasıyla standartlarda belirtilen limit değerleri aştığı,

✓ Yemekhane Servis alanında İOHK, havalandırma tesisatı bulunmaması nedeniyle olumsuz etkilendiği,

✓ Mekanik doğal hava beslemeli ile mekanik havanın iç ortamda tekrar kullanıldığı havalandırma tesisatlarının karşılaştırılmasında, mekanik doğal hava beslemeli tesisatlarının İOHK parametrelerini iyileştirdiği,

✓ Havalandırma tesisat ve sistemlerinin, iş sağlığı ve güvenliği mevzuatlarında belirtilen sürelerde yetkin kişiler tarafından bakım ve periyodik kontrolünün yapılması hususunun sürdürülebilir iş organizasyonuna olumlu katkı sağlayacağı,

✓ Etkin bir mühendislik kontrol tedbiri sağlanması amacıyla havalandırma tesisatının kurulmasının yanı sıra, kapalı ortamlarda kişi sayısını sınırlayıcı teknik önlem alınması gerektiği,

✓ İOHK parametrelerinin detaylı araştırılması amacıyla ortamdaki toz boyutunun da değerlendirilmesi gerektiği, belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu proje çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından, 43415 Proje No ile Genel Araştırma Projesi kapsamında "İç Ortam Hava Kalitesinin İş Sağlığı Ve Güvenliği Açısından Çalışanlar Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi: İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Kampüsü Örneği" başlığıyla desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %20

Kaynaklar

- [1] Indoor Air Quality Research, Euro Report and Studies. World Health Organization (WHO), No:103, 1988.
- [2] M. Frontczak and P. Wargocki, Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. World Health Organization, Building and Environment, 46(4), 922–937, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
- [3] I. Sarbu and C. Sebarchievici, Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. Energy and Buildings 60, 410–419, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.005>
- [4] R. M. Almeida, V. P. De Freitas, J. M. Delgado, School buildings rehabilitation: indoor environmental quality and enclosure optimization. Springer International Publishing, 35-83, 2015.

- [5] T. Kubo, T. Mizoue, R. Ide, N. Tokui, Y. Fujino, P. T. Minh, K. Shirane, T. Matsumoto, T. Yoshimura, Visual Display Terminal Work and Sick Building Syndrome – The Role of Psychosocial -Distress in the Relationship. *Journal of Occupational Health*, 107112, 2006. <https://doi.org/10.1539/joh.48.107>
- [6] Ü. Bulut Karaca, İç Ortam Kalitesinin Önemi Üzerine Bir Araştırma. *Kent Akademisi Dergisi*, 15(4):1724-1741, 2022. <https://doi.org/10.35674/kent.1118122>
- [7] P. L. Ooi, K. T. Goh, M. H. Phoon, S. C. Foo, M. H. Yap, Epidemiology of Sick Building Syndrome and its Associated Risk Factors in Singapore. *Occupational Environment Med.*, 55, 188-193, 1998. <https://doi.org/10.1136/oem.55.3.188>
- [8] 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2012.
- [9] İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2012.
- [10] İş Hijyeni Ölçüm, Test Ve Analizleri Hakkında Yönetmelik. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2017.
- [11] İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2013.
- [12] ASHRAE 62.1-2022, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.
- [13] ASHRAE 62.2-2022, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.
- [14] ASHRAE 55-2020, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.
- [15] I. Mujan, A. S. Anđelković, V. Munčan, M. Kljajić, D. Ružić, Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review. *Journal of Cleaner Production* 217, 646-657, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.307>
- [16] ISO 773, Rectangular or square parallel keys and their corresponding keyways (Dimensions in millimetres). International Organization for Standardization, 1969.
- [17] L. Schibuola, C. Tambani, High Energy Efficiency Ventilation to Limit COVID-19 contagion in School Environments. *Energy Build*, 240, 110882, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110882>
- [18] L. Schibuola, M. Scarpa, C. Tambani, Natural Ventilation Level Assessment in a School Building by CO2 Concentration Measures. *Energy Procedia* 257-264, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.033>
- [19] N. Mahyuddin, H. B. Awbi, A Review of CO2 Measurement Procedures In Ventilation Research. *Int. J. Vent.*, 353-370, 2012. <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683961>
- [20] E. Işık, S. Çibuk, Yemekhaneler ve kantinlerde iç hava kalitesi ile ilgili ölçüm sonuçları ve analizi -Tunceli Üniversitesi örneği. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 6:1, 39-50, 2015.
- [21] I. Annesi-Maesano, N. Baiz, S. Banerjee, P. Rudnai, S. Rive, Indoor air quality and sources in schools and related health effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 16, 491–550, 2013. <https://doi.org/10.1080/10937404.2013.853609>
- [22] Z. Bakó-Biró, D. Clements-Croome, N. Kochhar, Awbi, H. M. Williams, Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Building and Environment*, 48: 215–223, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>
- [23] U. Haverinen-Shaughnessy, D.J. Moschandreas and R.J. Shaughnessy, Association between standard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*, 21, 121–131, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x>
- [24] M.J. Mendell, E.A. Eliseeva, M.M. Davies, M. Spears, A. Lobscheid, W.J. Fisk, and M.G. Apte, Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in California elementary schools. *Indoor Air*, 23, 515–528, 2013. <https://doi.org/10.1111/ina.12042>
- [25] E. Simons, S. Hwang, E.F. Fitzgerald, C. Kielb and S. Lin, The impact of school building conditions on student absenteeism in upstate New York. *Am. J. Public Health*, 100(9), 1679–1686, 2010. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2009.165324>
- [26] C.C. Vassella, J. Koch, A. Henzi, A. Jordan, R. Waerber, R. Iannaccone, R. Charrière, From spontaneous to strategic natural window ventilation: Improving indoor air quality in Swiss schools. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 234, 113746, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113746>
- [27] L.M. Geelen, M.A.J. Huijbregts, A.M. Ragas, R.W. Bretveld, H.W. Jans, W.J. Van Doorn, S.J. Evertz, A. Van der Zijden, Comparing The Effectiveness Of Interventions To Improve Ventilation Behavior In Primary Schools. *Indoor Air* 18, 416-424, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00542.x>
- [28] A.C. Gielen, D. Sleet, Application Of Behavior-Change Theories And Methods To Injury Prevention *Epidemiol. Rev.*, Volume 25. 65-76, 2003. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxg004>
- [29] J. Zemitis, R. Bogdanovics, S. Bogdanovica, The Study of CO2 Concentration in A Classroom During The Covid-19 Safety Measures. *E3S Web Conf.* 246, 01004, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124601004>
- [30] C. Tam, Y. Zhao, Z. Liao, L. Zhao, Mitigation Strategies for Overheating and High Carbon Dioxide Concentration within Institutional Buildings: A Case Study in Toronto. *Buildings*, 10, 124, 2020. <https://doi.org/10.3390/buildings10070124>
- [31] M.W. Ahmad, J. Hippolyte, J. Reynolds, M. Mourshed, Y. Rezgui, Optimal Scheduling Strategy For Enhancing IAQ, Thermal Comfort And Visual Using A Genetic Algorithm. In *Proceedings Of The ASHRAE IAQ 2016*, Alexandria, VA, USA, 12–14, September 2016.

- [32] B. Chenari, F.B. Lamas, A.R. Gaspar, M.G. da Silva, Simulation Of Occupancy And CO2-Based Demand-Controlled Mechanical Ventilation Strategies In An Office Room Using Energy Plus. Energy Procedia 2017, 113, 51–57., 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.013>
- [33] H. Bulut, Havalandırma ve İç Hava Kalitesi Açısından CO2 Miktarının Analizi. Tesisat Mühendisliği, 128. Sayı, 61-70, 2012.
- [34] E. Bas, Indoor Air Quality-A Guide for Facility Managers. The Fairmont Pres, 2004.
<https://doi.org/10.1201/9781003151074>
- [35] İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Tüzüğü. Çalışma Bakanlığı, Ankara, 1974.
- [36] B. Karaca, İç Ortam Kalitesinin Önemi Üzerine Bir Araştırma. Kent Akademisi Dergisi, 15(4), 1724-1741, 2022. <https://doi.org/10.35674/kent.1118122>
- [37] F.C. Güney, Yüksel, F. Seçer, Kariptaş, F. Kariptaş, Ofis İç Mekanının Covid-19 Pandemisi Sonrası Yeniden Düzenlenmesi. báb Journal of FSMVU Faculty of Architecture and Design. 3 (1), 85-102, 2022.





Application of atomized hydrosols to rainbow trout fillets as an easy preservative Gökkuşığı alabalığı filetolarına kolay bir koruyucu olarak atomize hidrosollerin uygulanması

Emre Yavuzer^{1,*} , Mehmet Yetişen² , Dilek Yaprak Uslu³ 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, 51240, Niğde, Türkiye

³ Niğde Ömer Halisdemir University, Vocational School of Social Sciences, Cookery Department, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

In this study, a storage box including an ultrasonic atomizer was obtained with a 3D printer, and atomized hydrosols of thyme and lavender were applied to the fish meat at regular intervals under refrigeration conditions ($3\pm 1^\circ\text{C}$) for 6 days. The effects of application with atomized hydrosols on lipid oxidation (malondialdehyde levels), peroxide value (PV), total volatile basic nitrogen (TVB-N) level, microbiologic level, color changes, and texture parameters were investigated. The results of the study showed that aerosolizing hydrosol droplets on the meat protected the quality significantly as the storage period increased and that the ultrasonic atomizer could be used effectively in the preservation of food quality.

Keywords: 3D printer, Fish meat, Atomized hydrosols, Lipid oxidation

1 Introduction

The atomization of liquid is the process of ejecting small droplets in a gas environment after their disruption from a liquid layer [1-4]. In previous processes for atomizing liquids, mechanical atomizers have generally been used [5, 6]. However, the ultrasonic atomizer is more useful due to its structure, which is economical and can be connected to electronic circuits. Ultrasonic atomization is known as the process of removing fine droplets from a liquid layer exposed to ultrasound power greater than 20 kHz [3, 7]. Although there are many theories about the working logic of the ultrasonic atomizer [3, 8], according to the connection theory, the formation of droplets is caused by the interaction between random hydraulic shock and capillary waves produced by cavitation disorder [9].

Oxidative and microbial degradation of aquatic products are the most important problems in terms of storage of the product in processing technology. Depending on these deteriorations, undesirable changes in taste, smell, and color of the product may result in reduced shelf life [10, 11]. Since thyme and lavender oils are widely used in the food and pharmaceutical industries, the hydrosols of these plants appear as by-products.

In the present study, the reason for using these hydrosols to form microdroplets with an ultrasonic atomizer was the knowledge of their antimicrobial effects of them. For

Öz

Bu çalışmada, 3D yazıcı ile ultrasonik atomizör içeren bir saklama kutusu imal edilmiş ve atomize kekik ve lavanta hidrosolleri altı gün boyunca soğutma koşulları altında ($3\pm 1^\circ\text{C}$) balık etine belirli aralıklarla uygulanmıştır. Atomize hidrosollerle uygulamanın lipid oksidasyonu (malondialdehit seviyeleri), peroksit değeri (PV), toplam uçucu bazik azot (TVB-N) seviyesi, mikrobiyolojik seviye, renk değişiklikleri ve tekstür parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, depolama süresi arttıkça et üzerine hidrosol damlacıklarının aerosolize edilmesinin kaliteyi önemli ölçüde koruduğunu ve ultrasonik atomizörün gıda kalitesinin korunmasında etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: 3D yazıcı, Balık eti, Atomize hidrosoller, Lipid oksidasyonu

example, thyme oil has serious effects on some Salmonella species [12], resistant *Listeria monocytogenes* strains [12, 13] or *Enterococcus* spp [14], to name only a few of those in the literature. The lavender hydrosol is reported to contain linalool (24.52-39.2%), borneol (5.8-14.3%), cis-linalool oxide (18.2-25.0%) [15], whilst thyme hydrosol has carvacrol (48.30%) and thymol (17.55%) [16]. Additionally, our previous study [17] showed that some hydrosols have significant antimicrobial effects on foodborne spoilage and pathogenic microorganisms. However, there are no relevant studies in the literature on the effects of micro droplets of hydrosols obtained with an ultrasonic atomizer on the quality changes of fish meat. In this study, a fish storage box containing an ultrasonic atomizer was developed to increase the storage quality. The effect of this newly developed storage box on the freshness performance of fish meat during storage was calculated by sensory, chemical, and microbiological analysis. The ability to integrate the operating data obtained with a model box into larger storage environments in the industry will provide serious benefits for healthy food storage.

2 Materials and methods

2.1 Preparation of hydrosols

2.1.1 Compounds analysis of plant hydrosols

The components of the hydrosols of the thyme and lavender plants used in the study were determined by a gas

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emreyavuzer@gmail.com (E. Yavuzer)

Geliş / Received: 13.06.2023 Kabul / Accepted: 24.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1313983

chromatography-Mass spectrometry (GC-MS) device in Kırşehir Ahi Evran University Central Laboratory. The method given by [18] was applied to determine the components of thyme hydrosol. The method determined by [19] was used to specify the components of lavender hydrosol.

2.1.2 Ultrasonic atomizer and producing storage box with 3D printer

"Feellife Donut" brand portable humidifier was used as an ultrasonic atomizer in the study. The atomizer used in the study can work with 220 volts by connecting to an adapter, USB, or Arduino microcontroller. To obtain the 3D printed storage box, 1.75 mm white PLA filament and a standard 3D printer were used. Figure 1 shows the storage box with an ultrasonic atomizer. Approximately 1 kg (330 meters) of PLA filament was used for the construction of the 25x25x20cm box.

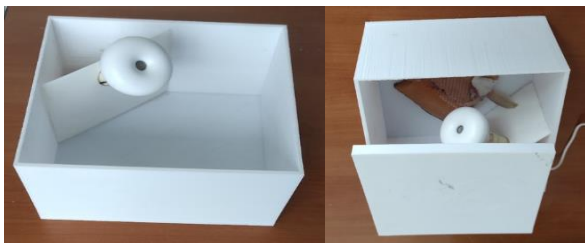


Figure 1. Storage box with ultrasonic atomizer

2.1.3 Electronic component used for color measurement

In the study, a TCS3200 color sensor (Figure 2) connected to an Arduino Uno was used to make color measurements. Color measurements were recorded on storage days for each group, as we did in our previous study [20].



Figure 2. TCS3200 color sensor used to determine the rainbow trout's meat color

2.1.4 Fish materials and storage conditions

The trout used in the study were obtained from a trout production facility (EZG Corp. Hirfanlı Dam/Turkey) located 20 minutes from our university laboratory. Harvested fish were delivered to the laboratory in polystyrene boxes

filled with ice. The average weight of the fish was 280 ± 23 g. In aseptic conditions, the fish were filleted and instantly placed in 3D-printed boxes for the control group and boxes including an ultrasonic atomizer for the test group. With the help of an Arduino microcontroller, the ultrasonic atomizer was able to spray hydrosol for 5 minutes every half hour. All data were prepared using the fish muscle that was stored at 3 ± 1 °C without ice for each analysis at 0, 1, 2, 3, 4, 5, and 6th days of storage.

2.1.5 Physicochemical analysis

The TBARS (mg malonaldehyde/kg), TVB-N (mg/100g), and PV (meq O₂ kg⁻¹) values of the rainbow trout were analyzed during storage according to the methods given by [21-23] respectively.

2.1.6 Sensory analysis

Sensory analysis was carried out according to the Quality Index Method [24], which we described in detail in our previous [17] study. During the sensory analysis, experienced panelists performed mouthwash and taste changes with diet biscuits during the transition between the groups.

2.1.7 Microbiological analysis

Triplicate samples were taken for total viable count (TVC / 2 days at 30 °C) and psychrotrophic count (PTC / 10 days at 6 °C).

3 Results and discussion

The components and ratios of the hydrosols used in the study are given in Table 1. The major compounds in thyme hydrosol were carvacrol and acetic acid, 58.72% and 10.58%, respectively. For lavender hydrosol, the highest determined compound was a-terpineol with 17.46%.

Table 1. Components of lavender and thyme hydrosols used in the study

Components of lavender hydrosol	RT	%	Components of thyme hydrosol	RT	%
Linalool-3,7-oxide	6.28	0.08	Hydroxyacetone	13.62	0.51
1,8-cineole	8.73	0.64	LINALLOOL OXIDE	19.44	0.26
Cis-ocimene	9.42	0.85	Acetic acid	20.41	10.58
Delta 3-carene	9.88	0.33	Methyltetrahydro-2-furanol	21.05	0.87
Cis-ocimene	10.08	5.84	Formic acid	23.67	0.28
3-octanol	13.86	0.10	a-butyrolactone	26.00	1.83
Linalool oxide	15.13	2.19	1-BORNEOL	28.03	0.23
Acetic acid	15.67	2.30	Epoxylinolol 4-	29.96	0.17
Trans Linalool oxide	15.87	1.96	Methylmannose	33.62	0.41
Camphor	16.98	0.43	Geranic oxide	35.83	0.63
Linalool	17.77	6.97	Terpinol	38.68	1.14
Linalyl acetate	17.95	4.36	Thymol	40.69	1.26
trans-Caryophyllene	18.86	0.24	Carvacrol	41.33	58.72
α-terpineol	21.39	17.46			
Epoxylinolol	22.81	1.10			
Betulin	23.68	0.31			
Farnesol	24.88	2.05			
7-Octene-2,6-diol, 2,6-dimethyl	29.56	16.77			
Terpinol	35.29	11.15			
D-carvone	39.33	2.58			

The fact that trout is rich in mono and polyunsaturated fatty acids makes it crucial as a functional food. But this richness makes the fish meat vulnerable to lipid oxidation. For this reason, analyzing PV is important to capture lipid oxidation. PV changes of the groups treated with different atomized hydrosols and stored at 3 ± 1 °C are given in Figure 3. PV values for all groups increased during storage, and there were statistically significant differences between the groups ($p < 0.05$). The initial PV value of this study ($2.57 \text{ meq O}_2/\text{kg}^{-1}$) was close to the initial PV value ($2.85 \text{ meq O}_2 \text{ kg}^{-1}$) of our previous study [17], where we stored trout on ice-containing extract. From the 2nd storage day to the 6th storage day, the PV values of atomized hydrosols of thyme and lavender were significantly lower than the control. The literature accepts the PV value between 10 and $20 \text{ meq O}_2/\text{kg}^{-1}$ as the upper limit for foodstuffs [25]. In this study, all test groups exceeded the level (<10) except for atomized thyme hydrosol. In the present study, it was seen that testing groups with atomized plant hydrosols showed a slower lipid oxidation rate than the control, so the results of this study indicate that the use of the atomized hydrosol is effective at delaying lipid peroxidation in rainbow trout.

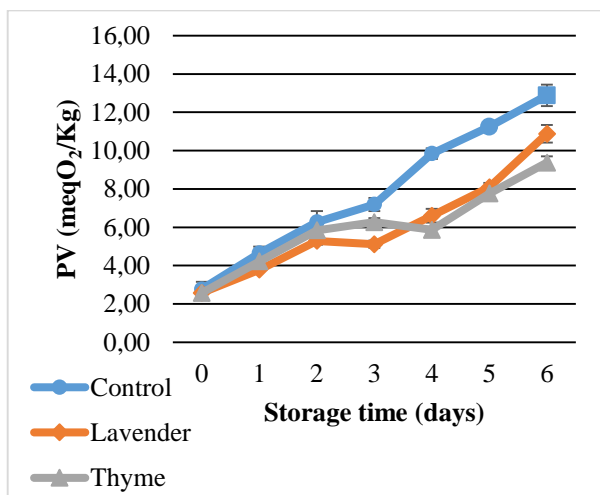


Figure 3. Peroxide value (PV) changes during storage in fish meat sprayed with different hydrosols with an ultrasonic atomizer

The TBARS value is a good indicator for predicting the degree of secondary oxidation and determining the quality of edible lipids. [26]. The effects of atomized hydrosols on the TBARS parameter are given in Figure 4. The beginning TBARS value of the samples was $0.6 \text{ mg malonaldehyde/kg}$ and increased in all groups during the storage. In our previous studies [17, 27] on the storage of trout, the maximum TBARS value was found to be $2.08 \text{ mg malonaldehyde/kg}$. In the current study, TBARS values did not rise to an extremely high level, although the fishes were not stored on ice. On the 4th, 5th and 6th days of storage, the TBARS values of the control and lavender groups were significantly ($p < 0.05$) higher than the thyme groups.

In the study, the initial TVB-N value was recorded as 19.09 mg/100 g . The TVB-N value contains ammonia, trimethylamine (TMA), and dimethylamine (DMA), which

cause them to increase through bacterial or enzymatic degradation [28].

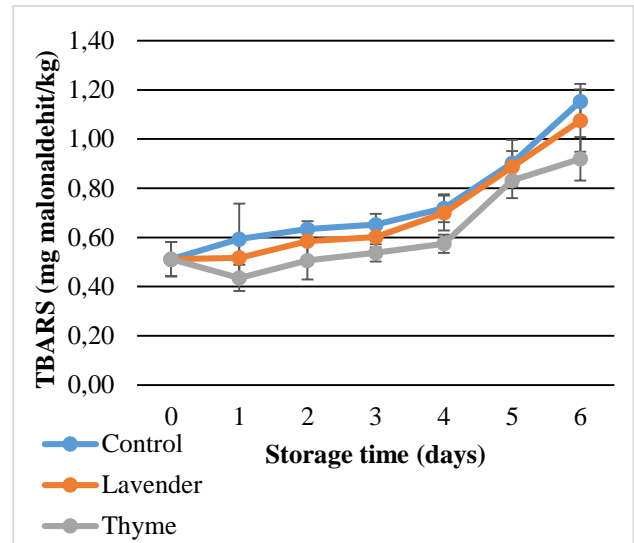


Figure 4. Thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS) changes during storage in fish meat sprayed with different hydrosols with an ultrasonic atomizer

In the study, the atomized thyme hydrosol group remained at significantly ($p < 0.05$) lower levels from the second storage day to the end of storage (Figure 5). Apart from this, the atomized lavender hydrosol group also had a significantly lower ($p < 0.05$) TVB-N value compared to the control group. When we compare the effects of thyme and lavender hydrosols in terms of TVBN with the control group, it is seen that their effects are statistically significant ($p < 0.05$). According to these results, it is concluded that bacterial or enzymatic degradation occurs less. Finally, the use of thyme and lavender hydrosols can be considered to have a protective effect on the sample.

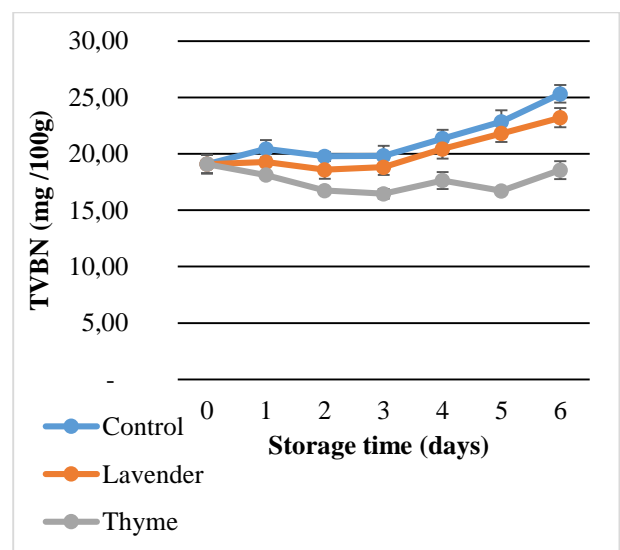


Figure 5. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) changes during storage in fish meat sprayed with different hydrosols with an ultrasonic atomizer

The sensory analysis performances of fish atomized with plant hydrosols during storage are given in Table 2. In terms of texture, water, odour, color, brightness, and state of meat fragmentation, all test groups had significantly ($p<0.05$) lower sensory scores than the control group during storage. On the other hand, the sensory parameters of atomized thyme hydrosol were recorded at lower levels than those of the lavender group during storage. When the sensory results were evaluated together with the microbiological and chemical results, it was observed that all tested groups gave highly effective results as preservation materials.

Table 2. Evaluation of sensory quality of raw trout meat

	Storage days	Control	Lavender	Thyme
Texture	0	0.00	0.00	0.00
	1	0.57±0.19 ^a	0.00	0.00
	2	1.29±0.49 ^a	0.43±0.19 ^a	0.50±0.00 ^a
	3	2.00±0.00 ^a	1.00±0.00 ^a	0.93±0.19 ^a
	4	3.00±0.00 ^{by}	2.07±0.19 ^{ax}	2.00±0.00 ^{bx}
	5	3.00±0.00 ^{by}	2.29±0.76 ^b	2.14±0.24 ^c
	6	3.00±0.00 ^{by}	3.00±0.00 ^{by}	3.00±0.00 ^{by}
Water	0	0.57±0.19 ^a	0.00	0.00
	1	0.36±0.24 ^a	0.36±0.24 ^a	0.36±0.24 ^a
	2	0.86±0.24 ^{ab}	0.50±0.00 ^a	0.57±0.19 ^a
	3	1.57±0.53 ^b	0.93±0.13 ^a	0.86±0.24 ^{ab}
	4	2.43±0.53 ^c	1.86±0.38 ^b	1.71±0.49 ^{bc}
	5	2.86±0.38 ^{dy}	2.14±0.38 ^{cxy}	2.00±0.0 ^{cxy}
	6	3.00±0.00 ^{by}	2.86±0.38 ^{dy}	2.43±0.53 ^c
Odour	0	0.00	0.00	0.00
	1	0.71±0.27 ^a	0.00	0.00
	2	1.86±0.38 ^a	0.50±0.00 ^a	0.71±0.27 ^a
	3	2.14±0.38 ^b	1.07±0.19 ^b	1.14±0.24 ^a
	4	3.00±0.00 ^{by}	1.93±0.19 ^{bxy}	1.86±0.38 ^{ax}
	5	3.00±0.00 ^{by}	2.43±0.53 ^{by}	2.0±0.58 ^{by}
	6	3.00±0.00 ^{by}	2.86±0.38 ^{dy}	2.86±0.38 ^{dy}
Color	0	0.00	0.00	0.00
	1	0.50±0.0 ^a	0.00	0.00
	2	1.00±0.00 ^a	0.79±0.27 ^a	0.71±0.27 ^a
	3	1.43±0.53 ^b	1.14±0.38 ^{ab}	1.00±0.00 ^a
	4	2.57±0.53 ^{by}	1.71±0.49 ^{abxy}	1.57±0.53 ^{ax}
	5	2.86±0.38 ^{cq}	2.14±0.38 ^{bx}	1.93±0.19 ^{bzy}
	6	3.00±0.00 ^{by}	2.43±0.53 ^{by}	2.00±0.0 ^{cxy}
Brightness	0	0.00	0.00	0.00
	1	0.36±0.24 ^a	0.21±0.27 ^a	0.00
	2	0.93±0.19 ^a	0.36±0.24 ^a	0.36±0.24 ^a
	3	1.71±0.49 ^a	1.21±0.27 ^{ab}	1.14±0.24 ^a
	4	3.00±0.00 ^{by}	1.86±0.38 ^{bx}	1.79±0.39 ^{ax}
	5	3.00±0.00 ^{by}	2.29±0.49 ^{cxy}	2.14±0.38 ^{bx}
	6	3.00±0.00 ^{by}	3.00±0.00 ^{by}	2.29±0.49 ^{cxy}
State of meat fragmentation	0	0.00	0.00	0.00
	1	0.43±0.19 ^a	0.00	0.00
	2	1.57±0.53 ^a	0.50±0.00 ^a	0.57±0.19 ^a
	3	2.14±0.38 ^a	1.29±0.49 ^a	1.07±0.19 ^a
	4	3.00±0.00 ^{by}	1.93±0.19 ^{by}	1.71±0.39 ^{by}
	5	3.00±0.00 ^{by}	2.00±0.29 ^{by}	1.93±0.45 ^{by}
	6	3.00±0.00 ^{by}	2.86±0.38 ^{sq}	2.43±0.53 ^{by}
Hydrosol odor	0	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.50±0.00 ^a	0.36±0.24 ^a
	2	0.00	0.86±0.24 ^a	0.50±0.00 ^a
	3	0.00	0.79±0.27 ^a	0.64±0.24 ^a
	4	0.00	0.43±0.19 ^{by}	0.57±0.53 ^{by}
	5	0.00	0.29±0.27 ^{by}	0.43±0.53 ^{by}
	6	0.00	0.36±0.24 ^a	0.79±0.27 ^a

Values in a same column followed by different letters (a. b. c) indicate significant differences ($p<0.05$) during storage periods. Values in a same row followed by different letters (x. y. z.) indicate significant differences in the parameter with respect to the plant treatment

The RGB (red, green, and blue) changes measured by the color sensor connected to the Arduino microcontroller are given in Table 3. The decrease in sensory meat score in fish meat and the decrease in RGB values obtained by Arduino showed parallelism with each other. On the 4th, 5th, and 6th days of storage, the atomized thyme hydrosol group, which

gave better color value than the control and lavender groups, had some differences according to sensor perceptions. The atomized thyme hydrosol group was more effective on these storage days according to the sensorial analyses, but thyme and lavender achieved similar color quality on the last storage day according to sensor values. This showed that machine sensory perception can make more sensitive measurements than human sensory perception.

Table 3. Changes in the color values of trout given by Arduino during chilling storage

Days	Meat Color (RGB)	Meat Color (RGB)	Meat Color (RGB)
	of Control $\bar{x}\pm Sd$	of Lavender $\bar{x}\pm Sd$	of Thyme $\bar{x}\pm Sd$
0	16±0.27 ^{ax} / 24±0.68 ^{ax}	16±0.27 ^{ax} / 24±0.68 ^{ax}	16±0.27 ^{ax} / 24±0.68 ^{ax}
		/ 26±0.21 ^{ax}	/ 26±0.21 ^{ax}
1	12±0.81 ^{bz} / 18±0.61 ^{bz}	13±0.81 ^{by} / 21±0.17 ^{by}	14±0.31 ^{bx} /
		23±0.40 ^{by}	23±0.48 ^{bx} /
2		/ 25±0.63 ^{bxy}	26±0.65 ^{ax}
			12±0.48 ^{cx} /
3	11±0.25 ^{cy} / 16±0.61 ^{cy}	12±0.51 ^{cx} / 18±0.61 ^{cx}	18±0.37 ^{cx} /
		/ 20±0.41 ^{cy}	23±0.24 ^{bx}
4			12±0.26 ^{dx} /
	10±0.12 ^{dz} / 15±0.67 ^{dy}	11±0.45 ^{dy} / 17±0.57 ^{ds}	17±0.37 ^{dx} /
5		/ 19±0.43 ^{dz}	22±0.42 ^{cx}
		/ 21±0.25 ^{dy}	11±0.20 ^{ex} /
6			16±0.63 ^{ex} /
	9±0.40 ^{ez} / 14±0.23 ^{ez} /	10±0.50 ^{ey} / 15±0.36 ^{ey}	19±0.72 ^{dx}
7		19±0.72 ^{ex}	19±0.72 ^{dx}
		/ 19±0.35 ^{ex}	
8			9±0.21 ^{fx} / 16±0.71 ^{ex}
	8±0.28 ^{fy} / 13±0.54 ^{fy} /	9±0.51 ^{fx} / 15±0.77 ^{fy} /	
9		19±0.41 ^{ex}	/ 19±0.23 ^{dx}
			8±0.32 ^{gx} /
10	8±0.32 ^{fx} / 12±0.34 ^{fx} /	8±0.32 ^{ex} / 12±0.34 ^{fx} /	12±0.34 ^{fx} /
			18±0.23 ^{ex}

Values (for red, green and blue separately) in a same column followed by different letters (a. b. c. d. e. f. g) indicate significant differences ($p<0.05$) during storage periods. Values in the same line followed by different letters (x.y.z.) show significant differences with other groups according to the color name of the same parameter

The microbiological changes of the tested fish during storage are given in Table 4. In terms of TVC data, all groups tested during storage performed much better than the control group. From the 2nd storage day to the end of storage, the thyme and lavender groups received significantly ($p<0.05$) lower TVC than the control group. According to our previous study [17] trout that was stored on ice, the TVC value was found to be 10.78 log cfu/g⁻¹ on the 18th day of storage. In the present study, the highest TVC value was 9.03 log cfu/g⁻¹ in the control group on the 6th day of storage. Although the control and lavender groups exceeded 7 log cfu/g⁻¹, which is the undesired level for TVC after the 5th day, the thyme group did not reach this level.

Table 4. Changes in the total viable count of trout meat during storage

Days	Control $\bar{x} \pm Sd$	Lavender $\bar{x} \pm Sd$	Thyme $\bar{x} \pm Sd$
0	2.13±0.09 ^{aX}	2.13±0.09 ^{aX}	2.13±0.09 ^{aX}
1	3.87±0.08 ^{bZ}	2.77±0.08 ^{bY}	2.09±0.10 ^{aX}
2	4.25±0.03 ^{cZ}	2.88±0.09 ^{bY}	2.12±0.08 ^{aX}
3	6.16±0.07 ^{dZ}	3.21±0.06 ^{cY}	2.33±0.10 ^{bX}
4	6.89±0.04 ^{eZ}	5.28±0.09 ^{dY}	3.98±0.05 ^{cX}
5	9.16±0.08 ^{fZ}	7.02±0.04 ^{eY}	5.75±0.04 ^{dX}
6	9.03±0.10 ^{fZ}	7.42±0.02 ^{fY}	6.82±0.04 ^{eX}

Different letters (a. b. c. d. e. f.) in the same column and different letters (X. Y. Z) in the same row show significant differences ($p < 0.05$)

4 Conclusion

Previous studies showed that thyme and lavender oils are natural antimicrobial and antioxidant agents for food preservation. But the hydrosols from them are generally unused waste material after the oil extraction process. In this study, it was discovered that adding atomized hydrosols to fish meat reduced the number of bacteria significantly ($p < 0.05$) while having no negative effects on the senses. The application of hydrosol drops made a significant contribution to the treatment groups having lower levels of TVB-N, TBARS and PV. The results of the study showed that the use of hydrosols remaining after oil extraction from plants as spray material can be used in industry due to their cheap and effective results.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 15

References

- [1] M. Mezhericher, I. Ladizhensky and I. Etlin, Atomization of liquids by disintegrating thin liquid films using gas jets. *International Journal of Multiphase Flow*, 88, 99–115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.015>
- [2] B. Patterson and D. L. Miller, Acoustic fountains and atomization at liquid surfaces excited by diagnostic ultrasound. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 45, 2162–2173, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2019.04.007>
- [3] H. Zhang, X. Zhang, X. Yi, F. He, F. Niu and P. Hao, Dynamic behaviors of droplets impacting on ultrasonically vibrating surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 112, 110019, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.110019>
- [4] Y. Zhang, S. Yuan and L. Wang, (2021). Investigation of capillary wave, cavitation and droplet diameter distribution during ultrasonic atomization. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 120, 110219. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110219>
- [5] F. Liu, N. Kang, Y. Li and Q. Wu, Experimental investigation on the spray characteristics of a droplet under sinusoidal inertial force. *Fuel* 226, 156–162, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.008>
- [6] J. X. Wang, Y. Z. Li, J. X. Li, C. Li, Y. Zhang, X. W. Ning, A gas-atomized spray cooling system integrated with an ejector loop: Ejector modeling and thermal performance analysis. *Energy Conversion and Management*, 180, 106–118, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.095>
- [7] P. Deepu, S. Basu and R. Kumar, Dynamics and fracture of ligaments from a droplet on a vibrating surface. *Physics of Fluids* 25, 082106, 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4817542>
- [8] R. Rajan and A. B. Pandit, Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation. *Ultrasonics* 39, 235–255, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(01\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(01)00054-3)
- [9] Y. Boguslavskii and O. Eknadiosyants, Physical mechanism of acoustic atomization of liquid. *Soviet Physics Acoustics*, 15, 14–21, 1969.
- [10] G. Singh, P. Marimuthu, H. S. Murali and A. S. Bawa, Antioxidative and antibacterial potentials of essential oils and extracts isolated from various spice materials. *Journal of Food Safety*, 25, 130–145, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.2005.00564.x>
- [11] L. Cao, J. Y. Si, Y. Liu, H. Sun, W. Jin, Z. Li, X. H. Zhao and R. L. Pan, Essential oil composition, antimicrobial and antioxidant properties of *Mosla chinensis* Maxim. *Food Chemistry*, 115, 801–805, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.064>
- [12] H. Miladi, D. Mili, R. Ben Slama, S. Zouari, E. Ammar and A. Bakhrouf, Antibiofilm formation and anti-adhesive property of three mediterranean essential oils against a foodborne pathogen *Salmonella* strain. *Microbial Pathogenesis*, 93, 22–31, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2016.01.017>
- [13] J. H. Han, D. Patel, J. E. Kim and S. C. Min, Retardation of *Listeria Monocytogenes* growth in mozzarella cheese using antimicrobial sachets containing rosemary oil and thyme oil. *Journal of Food Science*, 79, E2272–E2278, 2014. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12659>
- [14] A. P. Quendera, A. S. Barreto and T. S. Lemsaddek, Antimicrobial activity of essential oils against foodborne multidrug-resistant enterococci and aeromonads in planktonic and biofilm state. *Food Science and Technology International*, 25, 101–108, 2019. <https://doi.org/10.1177/1082013218799027>
- [15] R. Prusinowska, K. Śmigielski, A. Stobiecka and A. K. Styczyńska, Hydrolates from lavender (*Lavandula angustifolia*) – their chemical composition as well as aromatic, antimicrobial and antioxidant properties. *Natural Product Research*, 30, 386–393, 2016. <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1016939>
- [16] S. D'Amato, A. Serio, C. C. López and A. Paparella, Hydrosols: Biological activity and potential as antimicrobials for food applications. *Food Control*, 86,

- 126–137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.10.030>.
- [17] E. Yavuzer and E. K. Kuley, Testing the antimicrobial effects of some hydrosols on food borne-pathogens and spoilage bacteria. *Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research*, 6, 47–51, 2020. <https://doi.org/10.17216/limnofish.618101>.
- [18] Z. Özer, Chemical composition and antioxidant activities of leaf and flower essential oils of *Origanum onites* L. (Lamiaceae) growing in Mount Ida-Turkey. *J. Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 7, 813–820, 2020. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.780334>.
- [19] B. Li, C. Zhang, L. Peng, Z. Liang, X. Yan, Y. Zhu and Y. Liu, Comparison of essential oil composition and phenolic acid content of selected *Salvia* species measured by GC–MS and HPLC methods. *Industrial Crops and Products*, 69, 329–334, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.047>.
- [20] E. Yavuzer, Determination of rainbow trout quality parameters with Arduino microcontroller. *Journal of Food Safety*, 40, e12857, 2020. <https://doi.org/10.1111/jfs.12857>.
- [21] B. G. Tarladgis, B. M. Watts, M. T. Younathan and L. Dugan, A distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 37, 44–48, 1960. <https://doi.org/10.1007/BF02630824>.
- [22] N. Antonocopoulos, Bestimmung des flüchtigen Basenstickstoffes. W. Ludorf, V. Meyer (Eds.). *Fische und Fischerzeugnisse* 224–225, 1973.
- [23] AOCS, Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' society (4th ed.). Washington, 1994.
- [24] C. Bonilla, K. Sveinsdottir and E. Martinsdottir, Development of Quality Index Method (QIM) scheme for fresh cod (*Gadus morhua*) fillets and application in shelf life study. *Food Control*, 18, 352–358, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.10.019>.
- [25] L. Gram and H. H. Huss, Microbiological spoilage of fish and fish products. *International Journal of Food Microbiology*, 33, 121–137, 1996. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(96\)01134-8](https://doi.org/10.1016/0168-1605(96)01134-8).
- [26] A. E. Goulas and M. G. Kontominas, Combined effect of light salting, modified atmosphere packaging and oregano essential oil on the shelf-life of sea bream (*Sparus aurata*): Biochemical and sensory attributes. *Food Chemistry*, 100, 287–296, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.045>.
- [27] F. Özoğul, E. Yavuzer, Y. Özoğul and E. Kuley, Comparative quality loss in wild and cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during chilling storage. *Food Science and Technology Research*, 19, 445–454, 2013. <https://doi.org/10.3136/fstr.19.445>.
- [28] F. Özoğul and Y. Özoğul, Comparison of methods used for determination of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Turkish Journal of Zoology*, 24, 113–120, 2000.





Balya Pb/Zn flotasyon atığının BCR sıralı ekstraksiyon tekniği ile metal türleşmesinin belirlenmesi

Determination of metal fractionation of Balya Pb/Zn tailings by BCR sequential extraction technique

Emin Ender Çelebi^{1,*} 

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

Öz

Madencilik atıklarının potansiyel metal kirliliğinin fraksiyonel olarak belirlenmesinde metal türleşmelerinin bilinmesinin atığın jeokimyasal davranışının anlaşılması ve yönetiminde avantajlar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda, Balya Pb/Zn flotasyon atığındaki metallerin fraksiyonlarının belirlenmesi amacıyla modifiye Avrupa Topluluğu Referans Bürosu (BCR) yaklaşımı ile üç adımlı bir sıralı çözme gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla asetik asit, hidroksilamin hidroklorik + nitrik asit, hidrojen peroksit + asit amonyum asetat ve mikrodalga ortofosforik + nitrik asit özütlemeye yapılarak metallerin iyon değiştirilebilir (F1), indirgenebilir (F2), oksitlenebilir (F3) ve kalıntı (F4) fraksiyonları belirlenmiştir. Bunun sonucunda, en yüksek kolayca çözünebilir fazlar sırasıyla Ca, Cd, Zn, Pb, Mn ve Cu için elde edilirken; indirgenebilir fazlar Pb, Cu, Ag, Zn, Mg ve Mn olarak belirlenmiştir. K, Ti ve Al metallerinin ise neredeyse tamamı kalıntı fazda saptanmıştır. Çok değişkenli analizler yürütülerek metallerin fraksiyonel dağılım benzerliği istatistiksel olarak üç farklı kümede tespit edilmiştir. Kümelerden birinde, çoğunlukla oksitlenebilir fraksiyonda tespit edilen Co ve Ni yer alırken; toksik Pb, Cd ve Cu metallerinin ise istatistiksel olarak farklı bir küme içerisinde toplandığı saptanmıştır.

Anahtar kelimeler: Pb/Zn flotasyon atığı, Sıralı ekstraksiyon, Metal türleşmesi, Çok değişkenli analiz

1 Giriş

Balıkesir ili, Balya ilçesi sınırları içerisinde yer alan kurşun-çinko (Pb/Zn) madenciliği 1860'lı yıllardan itibaren yoğun bir şekilde devam etmektedir. Söz konusu madencilik faaliyetlerinden kaynaklı sülfütlü izabe ve flotasyon atıkları bölgenin farklı lokasyonlarında düzenli ve düzensiz şekilde depolanmaktadır [1]. Özellikle düzensiz depolanan atıklarda asitli drenajlar ve buna bağlı olarak sucul ekosisteme metal mobilizasyonu riski bulunmaktadır [2]. Son yıllarda uygulanan modern madencilik faaliyetleri ile ciddi miktarlarda meydana gelen flotasyon atıkları sürdürülebilir çevre yaklaşımı ile düzenli olarak depolanmaktadır. Ancak bu atıkların özellikle madencilik faaliyetleri tamamlandıktan sonra yönetimi de büyük önem arz etmekte olup potansiyel jeokimyasal risklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, literatürde saha özelinde temel jeokimyasal

Abstract

It is believed that knowing the speciation of metals is advantageous in understanding and managing the geochemical behavior of mine tailings with respect to potential metal pollution. Accordingly, a three-step sequential extraction was carried out by modified European Community Bureau of Reference (BCR) approach for fractionation of metals in Balya Pb/Zn tailing. Acetic acid leaching, hydroxylamine hydrochloride + nitric acid leaching, hydrogen peroxide + acid ammonium acetate leaching, and orthophosphoric + nitric acid digestion in microwave were performed to determine ion exchangeable (F1), reducible (F2), oxidizable (F3), and residual (F4) fractions of metals, respectively. As a result, the highest readily soluble fractions were obtained for Ca, Cd, Zn, Pb, Mn and Cu, respectively; while reducible fraction were determined as Pb, Cu, Ag, Zn, Mg and Mn. Almost all K, Ti, and Al metals were detected in the residual fraction. Multivariate analyses were carried out and the fractional distribution similarity of metals was statistically determined as three different clusters. In one of the clusters, Co and Ni, which are mainly found in the oxidizable fraction, were placed, while toxic metals of Pb, Cd, and Cu were found to be statistically grouped in a different cluster.

Keywords: Pb/Zn mine tailings, Sequential extraction, Metal fractionation, Multivariate analysis

analizler, asit maden drenajı potansiyeli, biyojeokimyasal karakterizasyon, petroloji ve alterasyon jeokimyası, metal geri kazanımı, ağır metal kirliliği riskleri ve radyoaktif karakterizasyon çalışmaları raporlanmıştır [1–11]. Ancak metallerin farklı redoks koşullarındaki davranışını anlamak amacıyla fraksiyonlarının belirlendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Metallerin geri kazanılması ve türleştirilmesi için bilimsel araştırmalarda sıklıkla sıralı ekstraksiyon işlemleri uygulanmaktadır [12, 13]. Türleşme için sıralı ekstraksiyon prosedürleri ilk olarak işlevsel olarak tanımlanmış olup fraksiyonlarına bağlı olarak eser elementlerin çıkarılması amacıyla Tessier vd. [14] tarafından önerilmiştir. Söz konusu prosedürler tam olarak spesifik olmamakla birlikte değişen çevresel koşullar ile topraklardaki jeokimyasal değişimleri ve metal hareketliliğini değerlendirmeye yardımcı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: e.celebi@gtu.edu.tr (E. E. Çelebi)

Geliş / Received: 13.06.2023 Kabul / Accepted: 08.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1314247

olabilmektedir [15, 16]. Sıralı ekstraksiyonun değiştirilmiş versiyonu daha sonra Avrupa Topluluğu Referans Bürosu (European Community Bureau of Reference, BCR) tarafından önerilmiştir. Bu üç adımlı sıralı ekstraksiyon prosedürü, kirlenmiş toprakları, sedimentleri ve atıkları karakterize etmek için sıklıkla güvenilir ve doğrulanmış bir yöntem olarak kullanılmıştır [15, 17–22]. Bu yöntemde, seçilen kimyasal reaktiflerin seçiciliği ve çalışma koşulları göz önüne alındığında, metaller onları barındıran matristen serbest bırakılmaktadır. Metaller operasyonel olarak asitte çözünür fraksiyon (suda çözünür ve karbonatlara bağlı, F1), indirgenebilir fraksiyon (Fe-Mn oksitlere gevşek bir şekilde bağlı, F2), oksitlenebilir fraksiyon (organik madde ve sülfite bağlı, F3) ve kalıntı fraksiyon (kuvvetli bağ fazları, F4) olmak üzere dört farklı fraksiyona ayrılmaktadır [23]. Balya flotasyon atıklarının potansiyel metal kirliliğinin fraksiyonel olarak belirlenmesinde metal türleşmelerinin bilinmesinin atığın jeokimyasal davranışının anlaşılması ve yönetiminde avantajlar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın birincil amacı, Balya Pb-Zn flotasyon atık malzemesinde bulunan majör ve minör metallerin türleşmesini belirlemektir. İkincil amaç, türleşmenin daha iyi anlaşılması için kimyasal verileri mineralojik verilerle desteklemektir. Bu amaçlar için, X-ışını kırınımı (XRD) ve ardından Rietveld arıtmasından oluşan kantitatif mineraloji prosedürlerinin yanı sıra, değişebilir (F1), indirgenebilir (F2), oksitlenebilir (F3) ve kalıntı (F4) fraksiyonların tayini için modifiye BCR üç aşamalı sıralı ekstraksiyon prosedürü uygulanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma sahası ve örnekleme

Pb-Zn cevher yatağı, Türkiye'nin Marmara bölgesinde, Balıkesir ilinin Balya ilçesi sınırında ve Balıkesir il merkezinin 49 km kuzeybatısında yer almaktadır. Kontakt/metasomatik (dasit-kireçtaşı dokanağı) tipte bir cevher yatağıdır. Maden sahası, dendritik drenaj ağları oluşturan inişli çıkışlı tepeler ve dar vadilerden oluşan dağlık bir bölgede kuruludur. Saha özelinde sülfütlü mineral toplulukları galen (PbS), sfalerit (ZnS), pirit (FeS₂) ve kalkopirit (CuFeS₂) oluşmaktadır [1, 2]. 2009 yılından

itibaren Eczacıbaşı ESAN A.Ş. tarafından yürütülen modern madencilik faaliyetleri neticesinde 2023 yılı itibarı ile yılda 1.5 milyon ton flotasyon atığı meydana gelmekte ve bu atıklar yaklaşık 450,000 m² yüzey alanlı atık depolama sahasında düzenli olarak depolanmaktadır. Üretim tesisi, atık sahası ve Balya şehir merkezinin konumları Şekil 1 içerisinde sunulmaktadır.

Bu çalışmada incelenen flotasyon atığı numunesi, atık sahasının on farklı noktasında neredeyse tamamen homojen olarak bulunan atık malzemesinin eşit miktarlarda bir araya getirilmesi ile toplam 10 kg olmak üzere kompozit halde elde edilmiştir. Baraj yüzeyinde karşılaşılan 10 cm kalınlığındaki kuru tabaka dikkate alınarak yüzeyin 50 cm altından örnekleme yürütülmüştür. Atıklar yaklaşık iki yıllık olup bu süre zarfında depolama sahasında doğal jeokimyasal süreçlere maruz kalmış şekilde seçilmiştir. Daha sonra laboratuvar ortamına alınan kompozit flotasyon atık örneği ilk önce 24 saat 105°C sıcaklık altında etüvde kurutulmuştur. Ardından Retch BB100 çeneli kırıcıda birkaç döngüde öğütülüp sonrasında elendikten sonra 63 µm tane boyulu elek altı malzeme elde edilmiş ve BCR sıralı ekstraksiyon prosedürüne hazır olarak stoklanmıştır.

2.2 Kimyasal ve mineralojik analizler

Balya flotasyon atığının kimyasal bileşimi ve bir metalin psödo toplam konsantrasyonu (*psödo total_m*), sırasıyla X-ışını floresans (XRF) tekniği ve indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektroskopisi (ICP-OES) ile gerçekleştirilen mikrodalga parçalama sonrası metal analizleri ile tespit edilmiştir. Mikrodalga parçalama işlemi, Milestone Start D marka ve model cihaz ile analitik saflıkta hidroklorik (HCl) asit, nitrik (HNO₃) asit ve hidroflorik (HF) asitten oluşan bir karışık çözelti ortamı (4:2:1, v:v:v) kullanılarak 24 dakika boyunca maksimum 650 W enerji sağlanarak gerçekleştirilmiştir. Majör oksitler ise Rigaku Primus ZSX IV marka ve model enstrümental XRF cihazı ile saptanmıştır. Ayrıca, Balya flotasyon atığının mineralojisini belirlemek için Bruker D8 Advance marka ve model XRD cihazı oda sıcaklığında 40 kV işletme gerilimi ve CuKα radyasyonu uygulanarak kullanılmıştır. Ek olarak, kantitatif mineraloji PROFEX yazılımı kullanılarak Rietveld rafinasyon tekniği ile belirlenmiştir [24].



Şekil 1. Balya Pb/Zn zenginleştirme tesisi birimlerinin ve ilçe merkezinin konumları

2.3 Sıralı ekstraksiyon prosedürü

Balya Pb/Zn flotasyon atığının metal türleşmesi modifiye BCR sıralı ekstraksiyon tekniği ile belirlenmiştir. Orijinal BCR prosedürü adımlar 1'den 3'e kadar (F1-F3) uygulanırken, mikrodalga parçalama prosedürü ise artık metal fraksiyonu (F4) ve psödo toplam metal içeriğinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Yürütülen sıralı ekstraksiyon prosedürü Tablo 1'de detaylı olarak sunulmaktadır.

Verilerin tekrar üretilebilirliğini belirlemek için üç tekrarlı deneyler yürütülmüştür. Bir metalin fraksiyonlanan toplam konsantrasyonu (F_{toplam_m}) Denklem (1) ile hesaplanmıştır. Ek olarak, ekstrakte edilen toplam metal miktarı ile psödo total metal ekstraksiyonun sonuçları karşılaştırılarak geri kazanım kontrol prosedürü yürütülmüştür. Sıralı ekstraksiyon yönteminin metal geri kazanım yüzdeleri, Denklem (2) ile hesaplanmıştır.

$$F_{toplam_m} = \text{aşama 1 } (F1_m) + \text{aşama 2 } (F2_m) + \text{aşama 3 } (F3_m) + \text{kalıntı } (F4_m) \quad (1)$$

$$\text{Geri kazanım } (\%) = \frac{F_{toplam_m}}{Psödo\ total_m} \times 100 \quad (2)$$

2.4 Çok değişkenli analizler

Çok değişkenli istatistikler, birbirinden bağımsız olarak birden fazla çıktı değişkeninin aynı anda gözlemlenmesi ve analiz edilmesini kapsayan istatistik dalıdır. Bu bağlamda, metal fraksiyonlarının dağılımının daha iyi anlaşılması için hiyerarşik kümeleme analizi (HCA) ve temel bileşen analizi (PCA) yapılmıştır [25]. Değişkenler, metallerin yüzde olarak fraksiyonel dağılımı iken gözlemler incelenen metallerdir. Metaller, Öklidyen uzaklıklar temelinde gruplandırılmıştır. Öte yandan, korelasyon matrisi PCA kapsamında iki bileşen çıkarılarak analiz edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mineraloji ve majör oksitler

Mineralojik tanımlama kapsamında, flotasyon atığının XRD deseni elde edilmiş ve Şekil 2 içerisinde verilmektedir. XRD deseni üzerinden, flotasyon atığında kaolinit, ortoklaz, muskovit, kalsit, kuvars ve pirit mineralleri majör mineraller olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, kalkantit, anhidrit, ankerit, dolomit ve sfalerit minerallerinin ise minör olarak varlıkları saptanmıştır. Ek olarak, Balya flotasyon atığı XRD verilerinin Profex yazılımı kullanılarak Rietveld rafinasyonu ile elde edilen kantitatif mineraloji sonuçları, XRF tekniğiyle belirlenen kantitatif majör oksit sonuçlarıyla birlikte Tablo 2 içerisinde verilmektedir. Rafinasyon parametrelerinin istatistiksel verileri de Tablo 3'te sunulmaktadır.

Ca, Fe, Al, K ve Mg elementlerinin XRF ve Rietveld rafinasyon tekniği ile elde edilen kantitatif sonuçları arasında %30 üzerinde rölatif standart sapma (RSD) değerleri saptanmıştır (Tablo 2). Rietveld rafinasyonunda elde edilen kabul edilebilir χ^2 (1.38) ve GoF (1.17) değerlerine rağmen (Tablo 3) atık bünyesindeki kil minerallerinin (aluminosilikatlar, kaolinit, ortoklaz, muskovit) XRD tekniği ile tespitindeki güçlük (çok bileşenli matris ve yazılımsal tercihler) bu duruma sebep olabilmektedir [26]. Her iki ölçüm tekniğinden flotasyon atıkları içerisinde ciddi miktarda kalsit (% 12.6) ve dolomit (% 1.15) alkali kaynakları ve kayda değer miktarda potansiyel asit üreticisi olarak pirit (%3.5) minerali tespit edilmiştir (Tablo 2). Ek olarak, ikincil sülfat mineralleri olarak kalkantit ve anhidrit ve ikincil karbonat minerali olarak ankerit saptanmıştır. Kalkantit minerali, bakır sülfür (kalkopirit gibi) yataklarının oksitlenmiş kısımlarında, genellikle madencilik faaliyetleri sonucu oluşan gang malzemesinde ikincil bir mineral olarak tanımlanmaktadır [27]. Anhidrit ise sülfütlü ve kalsitli mineralizasyon kontaklarında oluşabilen tipik bir gang mineralidir [28].

Tablo 1. Balya Pb/Zn flotasyon atığına BCR yaklaşımı ile uygulanan sıralı ekstraksiyon prosedürü

Fraksiyon	Ekstraksiyon koşulları (1 g atık başına)	Ekstraksiyon prosedürü	İlişkili tipik faz
F1: değiştirilebilir ve zayıf asitte çözünebilir	CH ₃ COOH 0.11 M (40 mL)	16 saat ^a oda sıcaklığında çalkalama, santrifüjleme ^b , katı-sıvı ayırma ^c , kalıntıyı yıkama, santrifüjleme ^b , katı-sıvı ayırma ^c (atıldı)	Kolay çözünebilir fazlar; karbonatlar, fosfatlar
F2: indirgenebilir	NH ₂ OH.HCl 0.1 M + HNO ₃ 0.15 M (pH= 1-2) (40 mL)	16 saat ^a oda sıcaklığında çalkalama, santrifüjleme ^b , katı-sıvı ayırma ^c , kalıntıyı yıkama, santrifüjleme ^b , katı-sıvı ayırma ^c (atıldı)	Mn ve Fe oksihidroksitler, zayıf bağlar
F3: okside edilebilir	Aşama 1: H ₂ O ₂ 8.8 M (pH= 2-3), (10 ml) Aşama 2: H ₂ O ₂ 8.8 M (pH= 2-3), (10 ml)	Kapalı kaptaki oda sıcaklığında 1 saat ^a çalkalama, açık kaptaki ~ 85 °C'de 1 saat ^a çalkalama	Organik madde ve sülfür kükürdü
F4: kalıntı	Aşama 3: CH ₃ COONH ₄ 1 M (pH= ~2), (50 ml) Hidroklorik, nitrik ve hidroflorik asit karışımı, (28 mL) (4:2:1, hacmen)	16 saat ^a oda sıcaklığında çalkalama, santrifüjleme ^b , katı-sıvı ayırma ^c , kalıntıyı yıkama, santrifüjleme ^b , katı-sıvı ayırma ^c (atıldı)	Kuvvetli bağ fazları

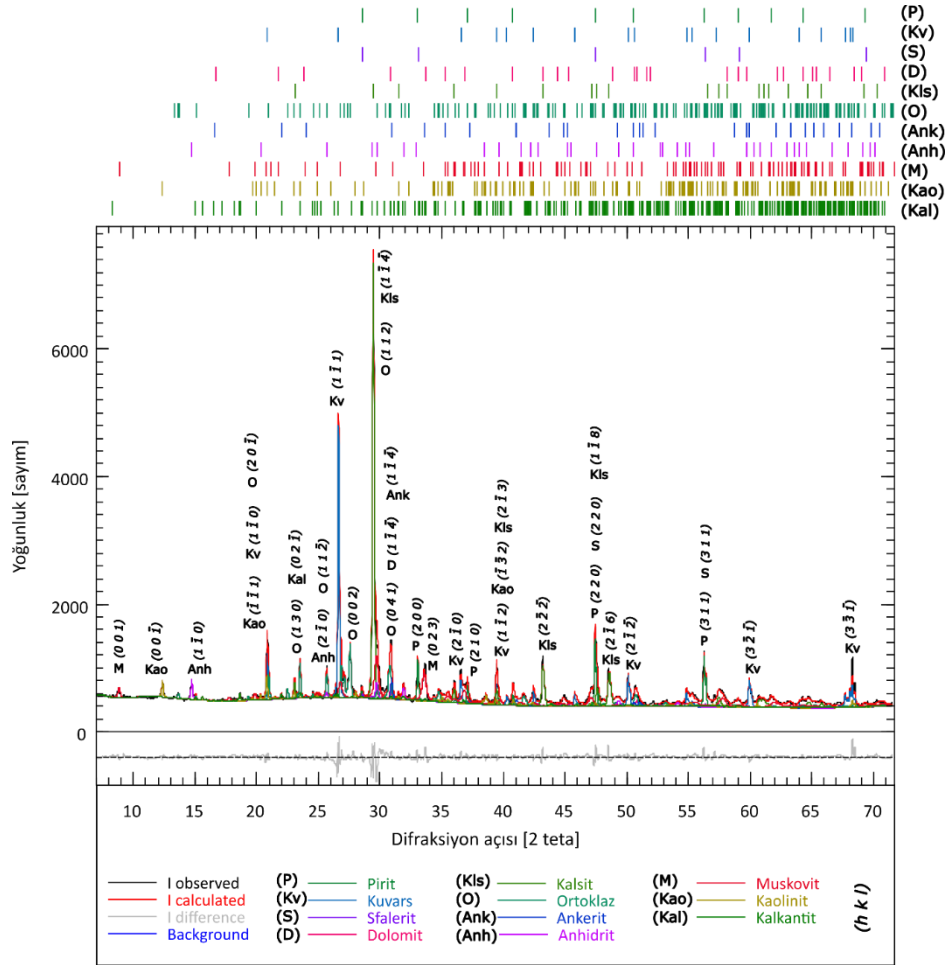
^a Isıtıcı orbital çalkalama, Biosan ES-20/60, 300 rpm

^b Hettich EBA 20 ile santrifüjleme, 6000 rpm, 15 dk

^c Süpermatant Pasteur pipeti ile alınmıştır

▪ Aşama 1-3 arasında orijinal BCR protokolü uygulanmıştır.

▪ Kalıntı faz parçalama işlemi orijinal BCR prosedürüne ait değildir.



Şekil 2. Balya flotasyon örneği X-Işını difraktomu ve piklerin Miller indisleri (h k l)

Tablo 2. Balya Pb/Zn flotasyon atığının majör oksitleri ve kantitatif mineralojisi

Kimyasal kompozisyon		Mineral kompozisyon		Element bazda sonuçlar				
Oksitler	%	Mineral	Kimyasal formül	%	Element	XRF	Rietveld	RSD%
SiO ₂	39.80	Kaolinit	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	24.0	Si	18.60	22.26	9.0
CaO	23.40	Ortoklaz	KAlSi ₃ O ₈	23.6	Ca	16.72	6.10	46.5
SO ₃	10.10	Muskovit	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	19.5	S	4.04	2.49	23.7
Fe ₂ O ₃	10.00	Kalsit	CaCO ₃	12.6	Fe	6.99	1.66	61.6
Al ₂ O ₃	8.07	Kuvars	SiO ₂	10.9	Al	4.27	10.83	43.4
K ₂ O	3.21	Pirit	FeS ₂	3.50	K	2.38	4.85	34.2
MgO	1.41	Kalkantit	CuSO ₄ .5H ₂ O	1.71	Mg	0.85	0.36	40.5
ZnO	1.18	Anhidrit	CaSO ₄	1.65	Zn	0.94	0.03	93.8
MnO	0.597	Ankerit	Ca(Fe ²⁺ .Mg)(CO ₃) ₂	1.56	Mn	0.46	n/d	utd
Na ₂ O	0.477	Dolomit	CaMg(CO ₃) ₂	1.15	Na	0.35	n/d	utd
PbO	0.404	Sfalerit	ZnS	0.05	Pb	0.37	n/d	utd
TiO ₂	0.314	Toplam		100.2	Ti	0.19	n/d	utd
As ₂ O ₃	0.120				As	0.09	n/d	utd
P ₂ O ₅	0.102				P	0.04	n/d	utd
CuO	0.054				Cu	0.04	0.44	83.3
SrO	0.026				Sr	0.02	n/d	utd
Cl	0.018				Cl	0.02	n/d	utd
Rb ₂ O	0.015				Rb	0.01	n/d	utd
ZrO ₂	0.011				Zr	<0.01	n/d	utd
Co ₂ O ₃	0.001				H	n/d	0.44	utd
Diğerleri	0.005				C	n/d	1.86	utd
Toplam	99.31				O	n/d	48.90	utd

n/d: tespit edilmedi. utd: tespiti mümkün değil

RSD %: Rölatif standart sapma

Tablo 3. Rietveld rafinasyonu istatistiksel verileri

Parametreler	Değer
^a Rwp	4.68
^b Rexp	3.99
^c χ^2	1.38
^d GoF	1.17
Zemin değer katsayıları	10

^a ağırlıklı profil artışı: kabul edilebilir değer <10
^b beklenen profil artışı: kabul edilebilir değer <10
^c ki-kare: kabul edilebilir değer <1,5
^d uyum iyiliği: 1,0'e yakın olması istenir

3.2 Metallerin sıralı ve psödo toplam ekstraksiyonları

Balya flotasyon atığındaki majör ve minör metallerin türleşmesi modifiye sıralı BCR testi ile belirlenmiştir. Ek olarak, bu metallerin psödo toplam konsantrasyonları mikrodalga parçalamayı takiben ICP-OES ile saptanmıştır. Fraksiyonlarına ayrılmış ve psödo toplam metallerin konsantrasyonları ve fraksiyonel rölatif yüzde dağılımları bar grafiği Tablo 4 ve Şekil 3 içerisinde sırasıyla verilmektedir.

Uygulanan yöntemin güvenilirliği ve verilerin tekrarlanabilirliği sırasıyla %96.1 ile %105.6 aralığında değişen tatmin edici geri kazanım değerlerinden ve <0.01 ile 7.33 aralığında değişen %RSD değerlerinden anlaşılmaktadır (Tablo 4). En yüksek iyon değiştirilebilir fraksiyon (F1) ise sırasıyla Ca, Cd, Zn, Pb, Mn ve Cu için tespit edilmiştir (Şekil 3). Bu duruma sebep olarak, kalsitin asetik asit çözeltisindeki yüksek çözünürlüğü ve flotasyon sonrası Zn ve Pb gibi proseste hedef metallerin serbest olarak bulunması düşünülmektedir [29]. Diğer metallerin ise kolay

çözünebilir fraksiyonları (F1) %8 mertebesinin altında kalmıştır (Şekil 3). Diğer yandan, Fe, Ti, Cr, Al ve K metallerinin neredeyse tamamının iyon değiştirilebilir formda olmadığı anlaşılmıştır (Tablo 4).

En yüksek indirgenebilir fraksiyona (F2) sahip metaller ağırlıkça %21.7 ile %60.2 aralığında olmak üzere sırasıyla Pb, Cu, Ag, Zn, Mg ve Mn olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Proseste hedef metaller olan Pb ve Zn metallerinin atıklardaki mevcudiyetinin zayıf bağlar ile teşkil olduğu tekrar anlaşılmıştır. Diğer metallerin indirgenebilir fraksiyonu ise %13 altında tespit edilmiştir (Şekil 3). Ca metalinin indirgenebilir fraksiyonuna (F2) çoğunlukla kalsiyum sülfat tuzlarının zayıf nitrik asit çözeltisi içerisindeki çözünürlüğünün katkı verdiği düşünülmektedir [30]. Artık fraksiyondaki (F4) Ca varlığının ise ilk üç fraksiyondaki yetersiz liç ajanı konsantrasyonu sebebiyle olduğu tespit edilebilmektedir.

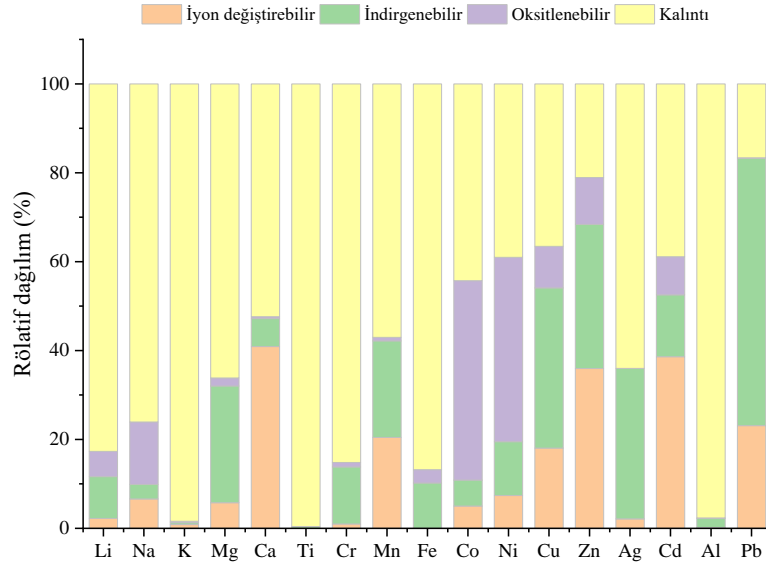
En yüksek artık fraksiyona (F4) sahip metaller ise sırasıyla Ti, K ve Al olarak %97.6 dağılım oranı üzerinde skorlar ile belirlenmiştir. Bu durum, aluminosilikatların (kaolinit, ortoklaz, muskovit vb.) ve titanyum oksitlerin zayıf asitli ve zayıf oksidasyon potansiyeline sahip ortamlara yüksek direnci ile açıklanabilmektedir [31, 32]. Ek olarak, Fe, Cr, Li, Na, Mg, Ag ve Mn metalleri de çoğunlukla (>%57 dağılım oranı ile) artık fraksiyonda (F4) saptanmıştır (Şekil 3).

Mineralojik analizde tespit edilen kalkantit (CuSO_4) mineralinin sudaki görece yüksek çözünürlüğü sebebiyle Cu metalinin hemen hemen yarısının iyon değiştirilebilir (F1) ve zayıf bağlarla bağlı fraksiyonda (F2) yer aldığı anlaşılmıştır [16].

Tablo 4. Balya Pb/Zn flotasyon atığının psödo toplam ve fraksiyonlarına ayrılmış metal konsantrasyonları (mg/kg)

	F1		F2		F3		F4, artık		Fraksiyonlanan toplam (n=3)		Psödo toplam (n=2)		Geri kazanım
	Ortalama	RSD%	Ortalama	RSD%	Ortalama	RSD%	Ortalama	RSD%	Ortalama	RSD%	Ortalama	RSD%	%
Li	0.29	6.43	1.24	2.63	0.75	5.44	10.52	3.21	12.80	4.43	13.19	1.59	97.1
Na	159.4	6.22	78.59	1.56	337.9	3.83	1,791	2.15	2,367	3.44	2,407	2.39	98.3
K	204.6	2.34	101.7	6.41	76.72	4.08	23,514	3.15	23,897	3.99	24,097	1.34	99.2
Mg	867.3	4.10	3,954	6.54	270.7	3.68	9,912	4.65	15,004	4.74	15,054	1.46	99.7
Ca	78,106	0.42	12,022	6.89	841.5	4.78	100,011	1.54	190,981	3.41	191,034	1.12	100.0
Ti	n/d	utd	7.36	7.33	0.24	4.88	1,892	2.65	1,900	utd	1,895	0.81	100.3
Cr	0.71	2.67	9.21	6.06	0.72	3.29	65.19	3.45	75.83	3.87	71.82	0.75	105.6
Mn	945.8	3.16	1,004	5.02	36.37	2.90	2,537	4.21	4,524	3.82	4,624	0.70	97.8
Fe	1.87	1.01	7,209	3.05	2,116	1.68	61,356	2.01	70,683	1.94	70,623	0.50	100.1
Co	0.75	2.53	0.87	4.35	6.67	3.08	6.78	3.54	15.06	3.37	14.86	0.80	101.3
Ni	2.00	1.63	3.28	1.72	11.23	4.95	11.56	2.13	28.07	2.61	27.08	1.03	103.7
Cu	75.88	2.44	151.3	4.34	39.38	0.71	150.5	2.65	417.1	2.53	420.1	0.19	99.3
Zn	3,410	1.55	3,076	3.40	998.8	6.19	1,929	3.87	9,414	3.75	9,485	0.20	99.3
Ag	0.16	<0.01	2.55	6.45	n/d	utd	4.52	1.25	7.23	utd	7.52	1.79	96.1
Cd	22.83	2.17	8.23	4.35	5.08	2.82	24.98	3.54	61.12	3.22	59.13	0.04	103.4
Al	76.44	0.70	936.9	2.95	21.22	4.95	43,605	3.68	44,639	3.07	44,139	0.13	101.1
Pb	868.1	1.78	2,260	3.84	3.42	5.39	554.2	2.47	3,686	3.37	3,757	0.88	98.1

n/d: tespit edilmedi. utd: tespiti mümkün değil
RSD %: Rölatif standart sapma



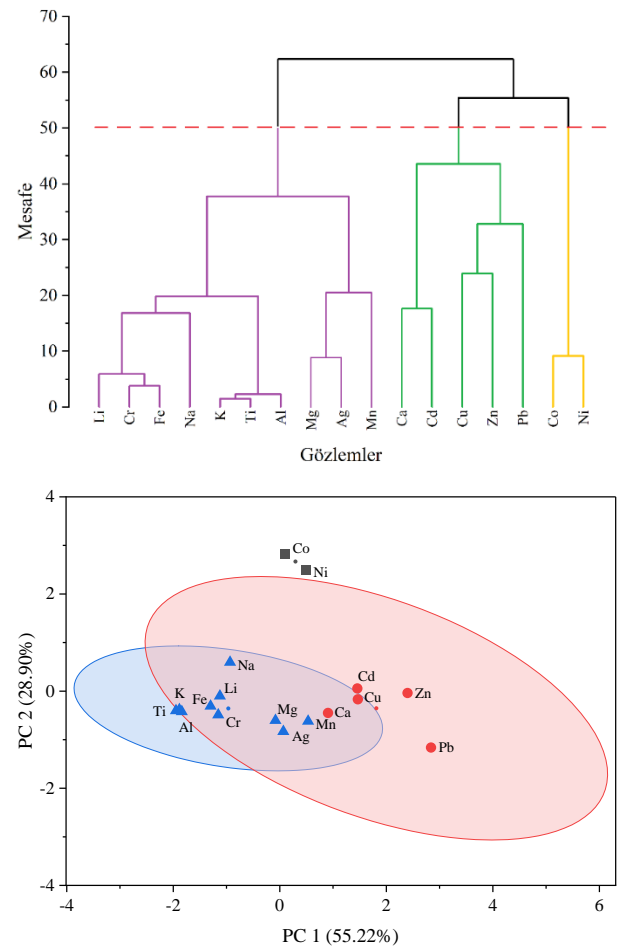
Şekil 3. Modifiye BCR ekstraksiyon tekniği ile belirlenmiş metal fraksiyonlarının bar grafiği

Fe metalinin indirgenebilir fraksiyonu (F2) ankerit varlığından; oksitlenebilir formu (F3) ise kısmen pirit (FeS_2) varlığından ileri geldiği düşünülmektedir. Fe metalinin artık fraksiyonda (F4) oldukça yüksek tespit edilmesinin sebebi, flotasyon atığındaki majör Fe minerali olan piritin çoğunlukla güçlü asit ajanları kullanımı ile yüksek enerji seviyelerinde mobilize olmasından ileri gelmektedir [16].

3.3 İstatistiksel değerlendirme

Balya Pb-Zn flotasyon atığının modifiye BCR sıralı ekstraksiyon prosedürü ile belirlenen metallerin fraksiyonel dağılımlarının hiyerarşik kümeleme ve temel bileşen analizleri yürütülerek üç farklı küme içerisinde benzerlik gösterdiği anlaşılmıştır (Şekil 4). Ek olarak, fraksiyonlarına ayrılmış metallerin temel bileşen analiz verileri ve korelasyon matrisinin özdeğerleri sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6 içerisinde verilmektedir.

Hiyerarşik küme analiz sonuçları incelendiğinde metaller fraksiyonel benzerlik açısından üç farklı kümede toplanmıştır. Artık fraksiyonda (F4) en fazla bulunan elementler, kısacası mobilizasyonu en zor elementler mavi elipsin içinde kalan Ti, K, Al, Fe, Cr, Li, Na, Mg, Ag ve Mn (1. grup); en kolay serbest kalan elementler ise çoğunlukla iyon değiştirilebilir ve indirgenebilir fraksiyonlarda (F1, F2) bulunan Pb, Zn, Cd, Cu ve Ca olarak tespit edilmiştir (2. grup). Mobilizasyon potansiyeli yüksek diğer bir grup, oksitlenebilir fraksiyonu (F3) yüksek Co ve Ni metallere oluşan 3. grup olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Fraksiyonlarına ayrılmış flotasyon atığı metallerinin hiyerarşik kümeleme (üstte) ve temel bileşen (PC) (altta) analizleri görselleri. Elipsler %95 güven aralığı ile tahmin edilmiştir.

Tablo 5. Fraksiyonlarına ayrılmış metallerin temel bileşen analizi verileri

Temel bileşen sayısı	Özdeğerler	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2	
Özdeğer	Özdeğer	55.22%	28.90%	55.22%	28.90%	
1	2.20892	Yükleme çizimi	Yükleme çizimi	Yükleme çizimi	Yükleme çizimi	Yükleme çizimi
2	1.15608	0	0	0.537	-0.11197	F1
3	0.635	0	0	0.52103	-0.33242	F2
4	9.93913E-31	0	0	0.10633	0.91306	F3
				-0.65487	-0.20804	F4

Tablo 6. Metallerin temel bileşen analizinin korelasyon matrisinin özdeğerleri

Özdeğer	Varyans yüzdesi	Kümülatif
1	2.22654	55.66%
2	0.97584	24.40%
3	0.79762	19.94%
4	0	0.00%

4 Sonuçlar

Çalışmada Balya Pb-Zn flotasyon atığının metal fraksiyonları BCR sıralı ekstraksiyon prosedürü ile belirlenmiş olup sonuçlar ve değerlendirmeler maddeler halinde özetlenmiştir;

- Mineralojik analizde kil mineralleri (alüminosilikatlar), kalsit (CaCO_3), kuvars (SiO_2) ve pirit (FeS_2) majör mineraller olarak tespit edilmiştir.
- Kalkantit (CuSO_4), anhidrit (CaSO_4) ve ankerit ($\text{Ca}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$) ikincil mineraller olarak saptanmıştır.
- Metaller fraksiyonel olarak üç farklı grupta kümelenmiştir.
- Çoğunlukla iyon değiştirebilir fraksiyonda saptanan Pb, Cd ve Cu ağır metallerinin sucul ekosisteme kolaylıkla mobilize olarak toksik etki yaratabileceği anlaşılmıştır.
- Proseste hedef metaller olan Pb ve Zn metallerinin çoğunlukla kolay ayrışabilir fraksiyonda olması adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerinden kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir.
- Co ve Ni metallerinin ise metalik sülfid formunda buldukları ve hidroliz-oksidasyon süreçleri ile liberasyon potansiyeli taşıdıkları tahmin edilmektedir.
- K, Ti, ve Al metallerinin neredeyse tamamı kalıntı fazda olup kuvvetli bağlar ile teşkil olduğu (kil mineralleri içerisinde) saptanmıştır.

Teşekkür

Yazar, araştırma altyapı imkânı sağladığı için Prof. Dr. M. Salim Öncel'e ve örnekleme sürecindeki yardımlarını esirgemeyen ESAN Eczacıbaşı personellerine en içten teşekkürlerini sunar.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Çıkar çatışması

Yazar herhangi bir çıkar çatışmasının söz konusu olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- E. E. Çelebi, M. S. Öncel, and M. Kobya, Acid production potentials of massive sulfide minerals and lead-zinc mine tailings: a medium-term study. *Water Science and Technology*, vol. 77, no. 1, pp. 260–268, Jan. 2018. doi: 10.2166/wst.2017.541.
- E. E. Çelebi and M. S. Öncel, Determination of acid forming potential of massive sulfide minerals and the tailings situated in lead/zinc mining district of Balya (NW Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, vol. 124, 2016. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.09.014.
- I. Kursun, S. Ozkan, K. Baztmaz, M. Terzi, and T. D. Tombal, Silver leaching from lead-zinc process tailings in Balya mines. in 16th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP2016), pp. 1–6, 2016.
- C. Şimşek, O. Gündüz, and A. Elçi, Terkedilmiş Balya (Balıkesir) Pb-Zn maden atıklarının ağır metal ve doğal radyoaktivite içeriği ve çevre kalitesi açısından değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 2, no. 1, p. 0, 2012.
- G. Gürtekin and E. Aydar, Quantitative mineralogy in characterization of historical tailings: A case from the abandoned Balya Pb-Zn mine, Western Turkey. *Natural Resources Research*, vol. 32, no. 1, pp. 195–212, 2023. doi: 10.1007/s11053-022-10128-6.
- N. Agdemir, M. S. Kirikoglu, B. Lehmann, and J. Tietze, Petrology and alteration geochemistry of the epithermal Balya Pb-Zn-Ag deposit, NW Turkey. *Miner Depos*, vol. 29, no. 4, pp. 366–371, 1994. doi:10.1007/bf00191043.
- A. Aykol, M. Budakoğlu, M. Kumral, A. H. Gültekin, M. Turhan, V. Esenli, F. Yavuz, and Y. Orgun, Heavy metal pollution and acid drainage from the abandoned Balya Pb-Zn sulfide mine, NW Anatolia, Turkey. *Environmental Geology*, vol. 45, no. 2, pp. 198–208, 2003. doi:10.1007/s00254-003-0866-2.
- I. Kursun, O. Ozdemir, F. Eskibalci, H. Hacifazlioglu, and M. Terzi, Dissolution of lead from lead-zinc tailings with nitric acid. XVII. Balkan Mineral Processing Congress, pp. 493–499, 2017.
- T. D. Tombul and İ. Kurşun Ünver, Characterization of Balıkesir Balya lead-zinc ore and determination of its particle shape factor. *MT Bilimsel*, no. 22, pp. 67–81, 2022.
- A. Baştürk and S. Aydoğan, Balya (Balıkesir, KB Türkiye) bölgesindeki flotasyon ve izabe atıklarında

- jeostatistiksel parametreler kullanarak modelleme ve kaynak hesabına örnek bir çalışma. Türkiye Jeoloji Bülteni, vol. 65, no. 1, pp. 53–78, 2022.
- [11] N. Çelik Balcı, S. Gül, M. M. Kılıç, N. G. Karagüler, E. Sarı, and M. Ş. Sönmez, Balya (Balıkesir) Pb-Zn madeni atık sahasının biyojeokimyası ve asidik maden drenajı oluşumuna etkileri. Türkiye Jeoloji Bülteni, vol. 57, no. 3, pp. 1–24, 2014.
- [12] E. E. Çelebi and M. S. Öncel, Boron recovery from montmorillonite clay waste using sequential leaching followed by cooling crystallization techniques. Arabian Journal of Geosciences, vol. 14, no. 9, p. 817, 2021. doi: [10.1007/s12517-021-07188-y](https://doi.org/10.1007/s12517-021-07188-y).
- [13] A. Hass and P. Fine, Sequential selective extraction procedures for the study of heavy metals in soils, sediments, and waste materials—a critical review. Crit Rev Environ Sci Technol, vol. 40, no. 5, pp. 365–399, 2010. doi: [10.1080/10643380802377992](https://doi.org/10.1080/10643380802377992).
- [14] A. Tessier, P. G. C. Campbell, and M. Bisson, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal Chem, vol. 51, no. 7, pp. 844–851, 1979. doi: [10.1021/ac50043a017](https://doi.org/10.1021/ac50043a017).
- [15] M. Pueyo, J. Mateu, A. Rigol, M. Vidal, J. F. López-Sánchez, and G. Rauret, Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils. Environmental Pollution, vol. 152, no. 2, pp. 330–341, 2008. doi: [10.1016/j.envpol.2007.06.020](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.020).
- [16] B. Dold, Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. J Geochem Explor, vol. 80, no. 1, pp. 55–68, 2003. doi: [10.1016/s0375-6742\(03\)00182-1](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00182-1).
- [17] M. Alan and D. Kara, Comparison of a new sequential extraction method and the BCR sequential extraction method for mobility assessment of elements around boron mines in Turkey. Talanta, vol. 194, pp. 189–198, 2019. doi: [10.1016/j.talanta.2018.10.030](https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.10.030).
- [18] V. Cappuyns, R. Swennen, and M. Niclaes, Application of the BCR sequential extraction scheme to dredged pond sediments contaminated by Pb-Zn mining: A combined geochemical and mineralogical approach. J Geochem Explor, vol. 93, no. 2, pp. 78–90, 2007. doi: [10.1016/j.gexplo.2006.10.001](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2006.10.001).
- [19] E. Fernández-Ondoño, G. Bacchetta, A. M. Lallena, F. B. Navarro, I. Ortiz, and M. N. Jiménez, Use of BCR sequential extraction procedures for soils and plant metal transfer predictions in contaminated mine tailings in Sardinia. J Geochem Explor, vol. 172, pp. 133–141, 2017. doi: [10.1016/j.gexplo.2016.09.013](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.013).
- [20] R. Larios, R. Fernández-Martínez, V. Silva, and I. Rucandio, Chemical availability of arsenic and heavy metals in sediments from abandoned cinnabar mine tailings. Environ Earth Sci, vol. 68, no. 2, pp. 535–546, 2013. doi: [10.1007/s12665-012-1757-1](https://doi.org/10.1007/s12665-012-1757-1).
- [21] K. F. Mossop and C. M. Davidson, “Comparison of original and modified BCR sequential extraction procedures for the fractionation of copper, iron, lead, manganese and zinc in soils and sediments,” Analytica Chimica Acta, vol. 478, no. 1, pp 111–118, 2003.
- [22] A. A. Qureshi, T. G. Kazi, J. A. Baig, M. B. Arain, and H. I. Afridi, Exposure of heavy metals in coal gangue soil, in and outside the mining area using BCR conventional and vortex assisted and single step extraction methods. Impact on orchard grass. Chemosphere, vol. 255, p. 126960, 2020. doi: [10.1016/j.chemosphere.2020.126960](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126960).
- [23] L. Tong et al., Evaluation of the BCR sequential extraction scheme for trace metal fractionation of alkaline municipal solid waste incineration fly ash. Chemosphere, vol. 249, p. 126115, 2020. doi: [10.1016/j.chemosphere.2020.126115](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126115).
- [24] N. Doebelin and R. Kleeberg, “Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN,” J Appl Crystallogr, vol. 48, no. 5, pp. 1573–1580, 2015. doi: [10.1107/s1600576715014685](https://doi.org/10.1107/s1600576715014685).
- [25] R. Devesa-Rey, F. Díaz-Fierros, M.T. Barral, “Trace metals in river bed sediments: An assessment of their partitioning and bioavailability by using multivariate exploratory analysis,” Journal of Environmental Management, vol. 91, no 12, pp. 2471–2477, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.06.024>.
- [26] X. Zhou, D. Liu, H. Bu, L. Deng, H. Liu, P. Yuan, P. Du, H. Song, XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review. Solid Earth Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 16–29, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2017.12.002>.
- [27] M. Bissengaliyeva, L. Ogorodova, M. Vigasina, L. Mel’chakova, D. Kosova, I. Bryzgalov, D. Ksenofontov, Enthalpy of formation of natural hydrous copper sulfate: Chalcantite. J Chem Thermodyn, vol. 95, pp. 142–148, 2016. doi: [10.1016/j.jct.2015.12.010](https://doi.org/10.1016/j.jct.2015.12.010).
- [28] E. C. Creaser, M. Steele-MacInnis, and B. M. Tutolo, A model for the solubility of anhydrite in H₂O-NaCl fluids from 25 to 800 °C, 0.1 to 1400 MPa, and 0 to 60 wt% NaCl: Applications to hydrothermal ore-forming systems. Chem Geol, vol. 587, p. 120609, 2022. doi: [10.1016/j.chemgeo.2021.120609](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120609).
- [29] Y. C. Kim and H. Yoon, Exploitation of acetic acid for calcite dissolution in small-capacity desalination plants. Desalination, vol. 516, p. 115227, 2021. doi: [10.1016/j.desal.2021.115227](https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115227).
- [30] Yu. A. Vershkova, O. A. Tareeva, K. G. Ivlev, and E. P. Lokshin, Solubility of calcium sulfate dihydrate in nitric acid at 20°C. Russian Journal of Applied Chemistry, vol. 76, no. 1, pp. 156–157, 2003. doi: [10.1023/a:1023380925093](https://doi.org/10.1023/a:1023380925093).
- [31] B. Lottermoser, Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts. Springer, 2010.
- [32] Y. Wu, Preparation of ultrafine powders by reaction–precipitation in impinging streams III: nano titania. Impinging Streams, pp. 301–315, 2007. doi: [10.1016/b978-044453037-0/50045-8](https://doi.org/10.1016/b978-044453037-0/50045-8).





Küresel iklim model verilerinin farklı yöntemlerle ayrıştırılması ve geleceğe yönelik yağış tahminlerinin yapılması

Disaggregation of global climate model data using different methods and predicting future precipitation

Burak Gül^{1,*} 

¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 21280, Diyarbakır Türkiye

Öz

Küresel iklim değişikliği, her geçen gün Dünya genelinde daha fazla etkisini artırarak tehlikeli sonuçlara neden olmaktadır. Özellikle iklim değişikliği kaynaklı şiddetli yağışlar, sel felaketlerine yol açmaktadır. Bu sel olayları, can kaybına ve maddi hasara neden olabilmektedir. Bu nedenle, çeşitli önleyici çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalardan biri, Yağış Şiddeti-Süre-Frekans (IDF) eğrilerinin oluşturulmasıdır. Ancak bu eğriler genellikle geçmiş tarihsel verilere dayandığından, gelecek için kullanılmaları uygun görülmemektedir. Bu nedenle, bu çalışmada iklim modeli verileri ve ayrıştırılmış yağış verileri kullanılarak iklim değişikliğini de içeren geleceğe yönelik yeni IDF eğrileri elde etmek için farklı yöntemler kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: İklim modelleri, Veri ayrıştırma, IDF eğrileri

1 Giriş

Küresel iklim değişikliği neredeyse bütün alanları doğrudan veya dolaylı yoldan etkileyerek canlı yaşamını önemli ölçüde etkilemektedir. Etkileri kimi bölgede kısa süreli kimi bölgede ise uzun ve kalıcı şekilde olabilmektedir. İklim değişikliğinin oluşmasına sebep olan birçok etken bulunmaktadır. Etkenler sırası ile şu şekildedir. Fosil yakıt kullanımı: Fosil yakıtların (kömür, petrol, doğal gaz) enerji üretimi, ulaşım ve endüstriyel faaliyetlerde yaygın olarak kullanılması, sera gazı emisyonlarını artırarak küresel iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Diğer bir etken ise sanayileşmedir. Sanayi sektöründeki faaliyetler, enerji ihtiyacını karşılamak ve üretim yapmak için büyük miktarda enerji kullanır. Bu durum, sera gazı emisyonlarının artmasına yol açmaktadır. Diğer bir sebep olan tarım ve hayvancılık faaliyetleri, sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Özellikle hayvancılık sektörü, metan gazı salınımıyla iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Ormanların Tahribi: Ormanların yok edilmesi veya büyük ölçüde tahrip olması, atmosferdeki karbondioksit seviyelerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, ormanlar karbondioksit emerek ve oksijen üreterek iklimin düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, ormanların azalması küresel iklim değişikliğini hızlandırır.

Abstract

Climate change affects the world with increasing severity, leading to dangerous consequences. Global Climate change is increasing its effects worldwide every day and causing dangerous consequences. Especially, intense rainfall events caused by climate change lead to flooding disasters. These flooding events can result in loss of life and property damage. Therefore, various preventive measures are being implemented. One of these measures is the development of Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves. However, since these curves are usually based on past historical data, they are not considered suitable for future use. For this reason, in this study, different methods were used to derive new IDF curves for the future, which include climate change, by using climate model data and disaggregated precipitation data.

Keywords: Climate models, Data disaggregation, IDF curves

Endüstriyel Süreçler: Çimento üretimi, kimyasal üretimi, demir ve çelik üretimi gibi endüstriyel süreçler sera gazı salınımına katkıda bulunmaktadır. Artan Nüfus ve Kentleşme: Hızla artan dünya nüfusu ve kentleşme, enerji talebini artırmakta ve sera gazı emisyonlarını yukarı seviyelere çıkarmaktadır. İnsanların ihtiyaçlarını karşılamak için enerji kullanımı ve kaynak tüketimi arttıkça, iklim üzerindeki etkiler de büyümektedir. Ulaşım: Karayolu, denizyolu, hava ve demiryolu taşımacılığı gibi ulaşım sektörleri, fosil yakıtların yoğun olarak kullanıldığı bir alandır. Motorlu araçların ve uçakların yol açtığı emisyonlar, küresel iklim değişikliğinin bir başka önemli etkenidir. Atık Yönetimi: Yanlış atık yönetimi ve atık bertarafı, metan gazı salınımına neden olabilmektedir. Metan gazı, karbondioksitten daha etkili bir sera gazıdır ve iklim değişikliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu etkenler toplu bir şekilde değerlendirildiğinde ve ayrıca tartışıldığında çoğu kaynağında belirtmiş olduğu üzere iklim değişikliğinin en büyük sebebi insan olduğu görülmektedir [1-5]. İnsanın etki oranının ise %90 civarında olduğu da ayrıyeten ortaya konulmuştur [3], [4]. İklim değişikliği çok önemli bir konu olduğundan ve etki alanı fazla olduğundan dolayı iklim değişikliği ile ilgili yapılmış çalışmalar çeşitli alt başlıklar etrafında değerlendirilerek iklim değişikliği

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: (brkg121@gmail.com) B. Gül

Geliş / Received: 14.06.2023 Kabul / Accepted: 25.07.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1314786

sorunu geniş bir yelpazede değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu alt başlıklar ve bu başlıkların içeriği şu şekildedir: İklim Modelleri ve Senaryoları, iklim değişikliğinin etkilerini anlamak için bilgisayar tabanlı iklim modellerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir [6-8]. Mevcut iklim verilerine dayanarak gelecekteki iklim senaryoları oluşturulur ve iklim değişikliğinin olası etkileri değerlendirilir. Hava ve Deniz Gözlemleri, atmosferde ve denizlerde meydana gelen değişikliklerin izlenmesi için hava ve deniz gözlem istasyonları kullanılarak yapılan gözlemler üzerinde odaklanır [9-12]. Bu gözlemler, iklim değişikliğinin belirtilerinin tespit edilmesi ve değişikliklerin izlenmesi için önemli veriler sağlar. Sera Gazı Emisyonları, iklim değişikliği ile en güçlü ilişkilendirilen faktörlerden biridir. Bu çalışmalar, sera gazı kaynaklarının belirlenmesi, emisyonların izlenmesi ve azaltma stratejilerinin geliştirilmesi üzerine odaklanır [13-15]. İklim Değişikliğinin Biyolojik Etkileri, iklim değişikliğinin doğal ekosistemler üzerindeki önemli etkilerini araştırmaktadır. Bu çalışmalar, iklim değişikliğinin bitki ve hayvan türleri üzerindeki etkilerini, habitat kaybını, türlerin göç hareketlerini ve biyolojik çeşitlilik üzerindeki potansiyel tehlikeleri incelemektedir [16-18]. Deniz Yükselmesi ve Okyanus Asitlenmesi, küresel iklim değişikliğinin deniz seviyesinde yükselmelere ve okyanusların asitlenmesine neden olduğu konusunda yapılan çalışmaları içerir [19-21]. Bu çalışmalar, deniz seviyesi yükselmesinin etkilerini, kıyı bölgeleri için riskleri ve okyanus ekosistemlerindeki değişiklikleri analiz etmeye yöneliktir. İklim Değişikliği ve İnsan Sağlığı, iklim değişikliğinin insan sağlığı üzerindeki önemli etkilerini araştırmaktadır. Bu çalışmalar, artan sıcaklık, aşırı hava olayları, salgın hastalıklar, besin kaynaklarının etkilenmesi gibi konuları içeren iklim değişikliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemektedir [22-24]. İklim Politikaları ve Uyum, iklim değişikliğiyle mücadele etmek için politikaların ve uyum stratejilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaları içerir. Bu çalışmalar, uluslararası iklim anlaşmaları, enerji dönüşümü, sürdürülebilir kalkınma ve toplumların iklim değişikliğiyle başa çıkma becerilerinin geliştirilmesi gibi konulara odaklanır [25-27]. Bu çalışmada ise küresel iklim modelleri ve senaryoları başlığı altında özellikle su yapılarının projelendirilmesinde büyük önem arz eden yağış şiddeti-süre-frekans (IDF) eğrilerinin geleceğe yönelik tahmin edilmesi üzerine olmuştur. IDF eğrileri barajlar, drenaj sistemleri, köprü, menfez gibi yapıların tasarım debilerinin hesabı için kullanılmaktadır. Bu konu hakkındaki temel sorun IDF eğrilerinin genellikle tarihsel veriler ışığında yapılmış olmasıdır. Tarihsel verilerle oluşturulmuş IDF eğrileri, geleceğe yönelik iklim değişikliğini de içinde barındıran veriler sağlayamamaktadır. Bu sorunun çözülmesi için ise küresel iklim modelleri ve senaryolarına ait veriler kullanılarak geleceğe yönelik IDF eğrileri türetilmiştir. Küresel iklim model verileri günlük toplam yağış halinde bulunduğundan IDF eğrilerinin oluşturulması için standart süreli yağış verilerine (5, 10, 15, 30dk, 1-24 saat) ayrıştırılması gerekmektedir. Ayrıştırmak için çalışmada iki farklı metod kullanılmıştır. Bunlardan ilki eşdeğer kuantil eşleştirme metodu (EQM), ikincisi ise yapay sinir ağları (ANN) olmuştur. Yapay sinir ağları (ANN) ve

küresel iklim modelleri, iklim değişikliği ve iklim sisteminin analizi için önemli araştırma araçları olarak kabul edilmektedir. Matematiksel modeller olan yapay sinir ağları, biyolojik sinir sistemlerinden ilham alınarak tasarlanmaktadır ve karmaşık veri setlerindeki desenleri ve ilişkileri tanımlama ve öğrenme yeteneklerine sahiptir. Öte yandan, küresel iklim modelleri, dünya genelindeki iklim sisteminin karmaşık etkileşimlerini simüle etmek amacıyla kullanılan matematiksel ve istatistiksel modellerdir. Bu modeller, atmosfer, okyanus, buz tabakaları ve diğer bileşenler arasındaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri içermektedir. Yapay sinir ağları, karmaşık iklim verilerindeki desenleri ve ilişkileri tanımlama ve analiz etme kabiliyetleri nedeniyle küresel iklim modelleri için değerli bir araç olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, yapay sinir ağları, iklim değişikliği göstergelerini belirleme, iklim tahminleri yapma ve gelecekteki iklim senaryolarını oluşturma gibi amaçlar doğrultusunda gözlemsel verileri analiz etmek için kullanılabilmektedir [28-29]. Ayrıca, yapay sinir ağları, küresel iklim modellerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesinde de etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Eşdeğer kuantil eşleştirme ve yapay sinir ağları ile yapılan hesaplamalar doğrultusunda eşdeğer kuantil eşleştirme metodunun daha uygun sonuçlar verdiği yapay sinir ağlarına göre daha avantajlı olduğundan bulgular EQM'ye göre elde edilmiştir. Ordu ili için yapılan hesaplamalarda HadGEM-ES, MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M modelleri ve RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait ayrıştırılmış yağış verileri aracılığı ile IDF eğrileri türetilmiştir.

2 Çalışma alanı

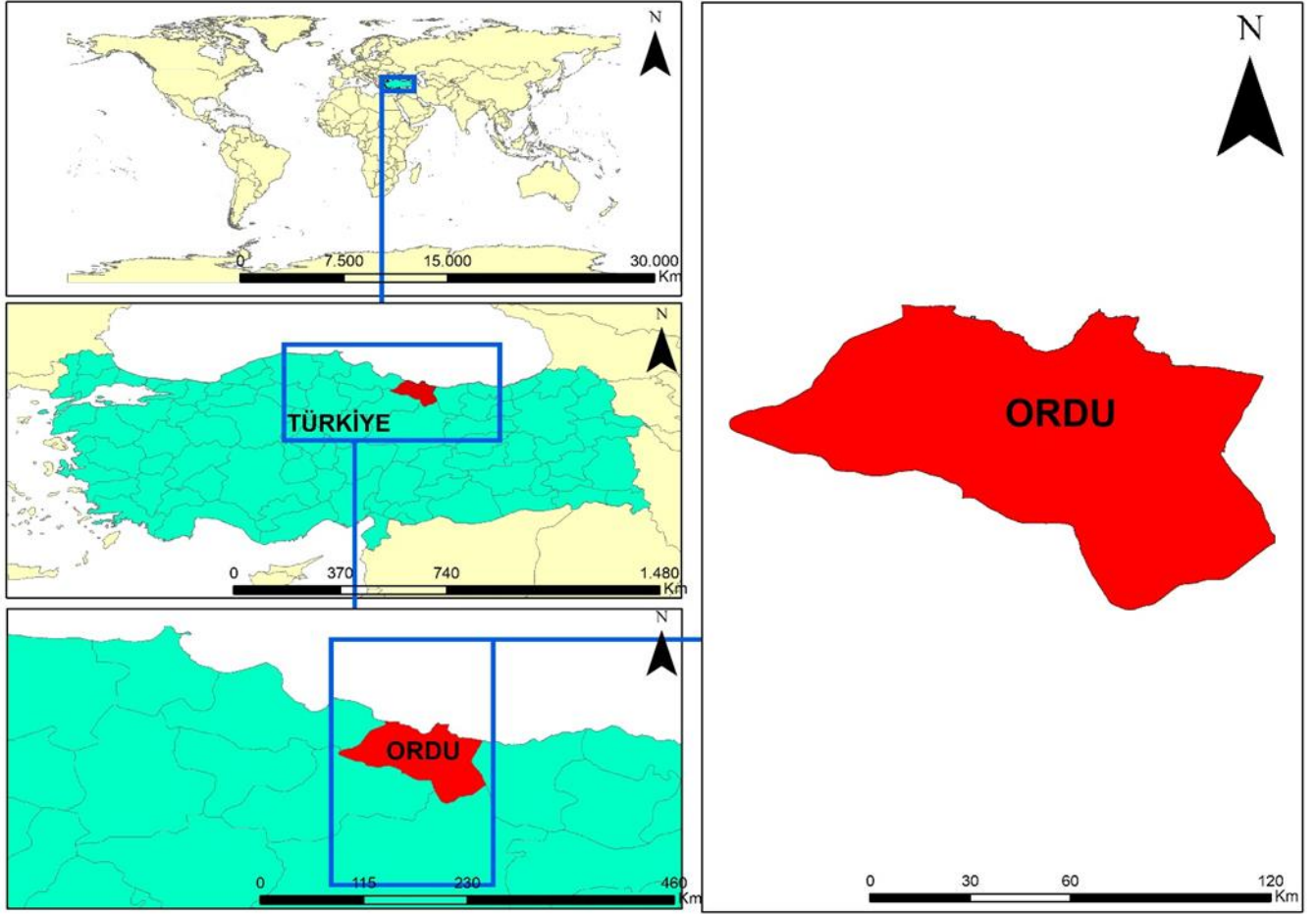
Çalışma alanı olarak Ordu ili seçilmiştir. Ordu genel olarak ılıman bir iklimle sahiptir. Yağışlar yıl boyunca dağınık gösterirken, kış aylarında genellikle daha yoğun bir şekilde yağış alır. Yaz aylarında da Karadeniz'in etkisiyle yağışlar devam edebilmektedir. Sıcaklık ise mevsimlere bağlı olarak Ordu'da değişiklik gösterir. Sıcaklık değerleri genellikle yaz aylarında 25-30 derece aralığında seyrederek, ancak bölgedeki yüksek nem nedeniyle hissedilen sıcaklık daha yüksek olabilmektedir. Kış aylarında ise sıcaklık genellikle 5-15 derece arasında değişir. En yüksek yağış miktarı ise yaklaşık 150 mm civarındadır. Ordu iline ait istasyon bilgileri Tablo 1'de lokasyon haritası ise Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma alanı ait istasyon bilgileri

Enlem	Boylam	Yükseklik (m)
40,8213	37,861	5

3 Çalışmada kullanılan veri setleri

Çalışmada kullanılan veriler sırası ile MPI-ESM-2M, HadGEM-ES, GFDL-ESM2M küresel iklim modellerinin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait 2023-2098 yıllarını kapsayan günlük toplam yağış verileri, iklim modellerine ait 1971-2000 yıllarını kapsayan tarihsel veri seti ve son olarak da Ordu iline ait 1971-2000 yıllarına ait standart süreli yıllık maksimum yağış verileri olmuştur. Kullanılan tüm veri setleri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden (MGM) temin edilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı lokasyon haritası

HadGEM-ES iklim modeli, İngiltere'nin Hadley Centre for Climate Prediction and Research tarafından geliştirilmiştir. Atmosfer, okyanuslar, buzullar ve biyosfer dahil olmak üzere çeşitli bileşenlerin etkileşimini simüle etmektedir. GFDL-ESM2M iklim modeli ABD'nin Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) tarafından geliştirilmiştir. GFDL-ESM2M, atmosfer, okyanus, buz ve karasal sistemlerin etkileşimini içeren bir Dünya iklim modelidir. MPI-ESM-MR iklim modeli Almanya'daki Max Planck Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir.

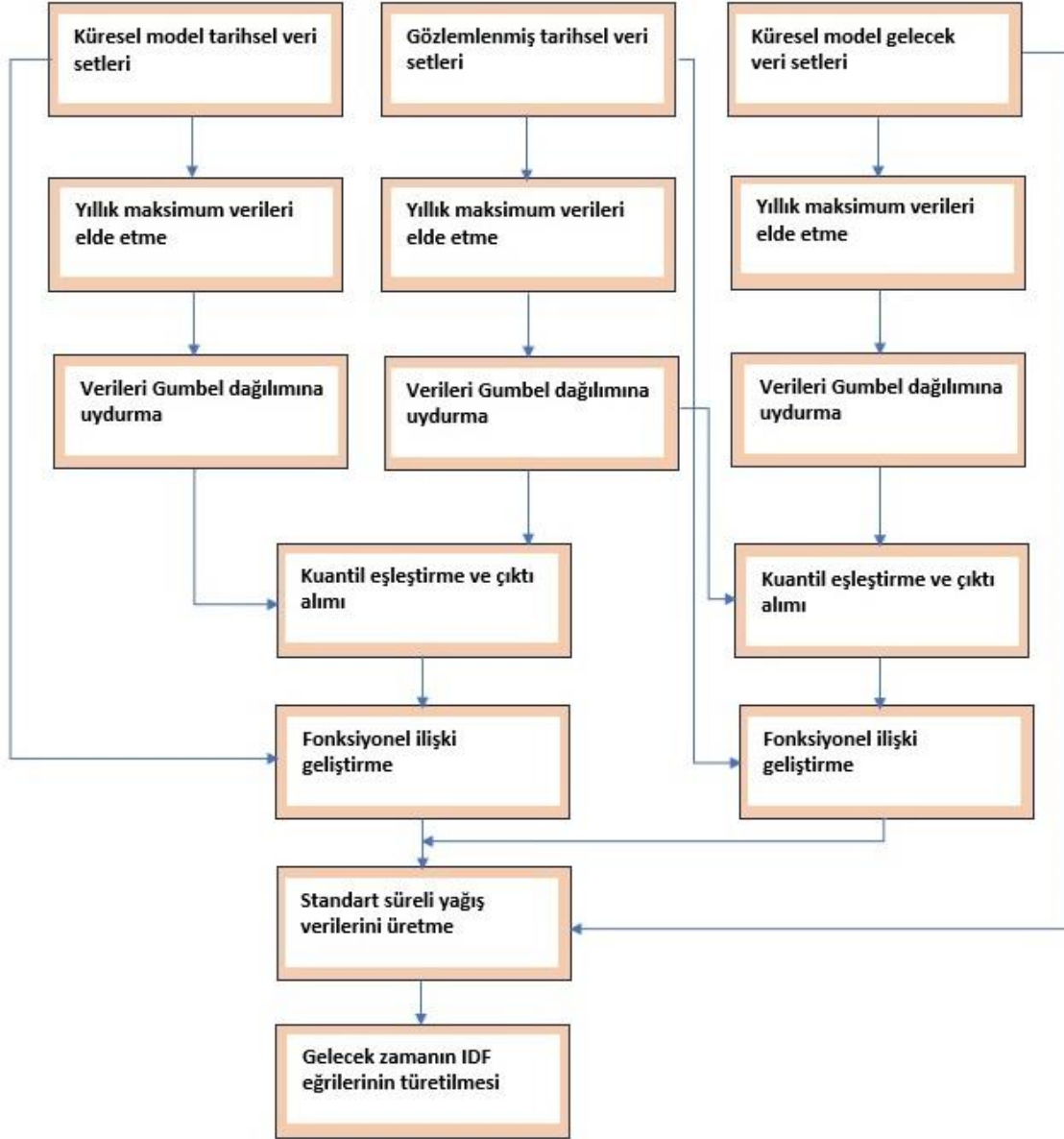
MPI-ESM-MR, atmosfer, okyanus, buz ve karasal sistemlerin karmaşık etkileşimlerini simüle eden bir iklim modelidir. Küresel iklim modellerinin orijinal halleri yüksek çözünürlükte oldukları için bu verilerle şehir veya bölgesel çapta inceleme yapmak ciddi anlamda zor ve anlamsızdır. Bundan dolayı bu veriler MGM tarafından RegCEM4.3.4 bölgesel ölçek küçültme işlemi yapılarak veriler 115-220 m çözünürlükten 20 m çözünürlüğe yükseltilmiştir. Çalışmada kullanılan iklim modellerinin dışında birçok iklim modeli bulunmaktadır. Fakat MGM'nin yaptığı çalışmalar sonucunda Türkiye'nin iklim dinamiklerine ve iklim tiplerine en uygun modeller çalışmada kullanılan modeller olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan veriler, 20 m çözünürlüğe sahip veriler olmuştur.

4 Metotlar

4.1 Eşdeğer kuantil eşleştirme metodu

Şekil 2'de kullanılan birinci metodun işlem adımları gösterilmiştir. İşlem adımlarının ayrıntılı açıklaması aşağıda belirtilmiştir.

- İlk olarak küresel modellerin tarihsel veri setinin, gelecek veri setinin ve Ordu iline ait gözlemlenmiş yağış veri setlerine ait verilerden yıllık maksimum yağış verileri elde edilir.
- İkinci aşamada ise her bir veri seti için, Gumbel dağılımını en iyi şekilde uyduran dağılım parametreleri hesaplanır. Bu parametreler, veri setinin istatistiksel dağılımını tanımlayan özelliklerdir.
- Küresel iklim modellerine ait günlük maksimum verileri ile gözlemlenen standart süreli maksimum veri serileri arasında bir istatistiksel ilişki kurulur. Bu ilişki, kuantil eşleştirme prensibi kullanılarak elde edilir. Küresel iklim modelinin kümülatif olasılık dağılımı ile standart süreli serilerin kümülatif olasılık dağılımı birbirine eşitlenerek istatistiksel bir ilişki kurulur (Denklem 1, Denklem 2).



Şekil 2. Eşdeğer kuantil eşleştirme metodu işlem adımları [30]

$$Y_{max,j}^{STN} = f(X_{max}^{GCM}) \quad (1)$$

$$Y_{max,j}^{STN} = a_1 * X_{max}^{GCM} + b_1 \quad (2)$$

- Küresel iklim modellerine ait tarihsel veri setlerinin maksimum verileri ile küresel iklim modellerine ait gelecek maksimum yağış verileri kümülatif olasılık dağılımları arasında benzer bir kuantil eşleştirmeye dayalı istatistiksel ilişki kurulur (Denklem 3, Denklem 4).

$$Y_{max}^{GCM,FUT} = f(X_{max}^{GCM}) \quad (3)$$

$$Y_{max}^{GCM,FUT} = a_2 * X_{max}^{GCM} + b_2 \quad (4)$$

- Bir sonraki adımda ise Denklem (3) ve Denklem (4) birleştirilerek aşağıdaki denklem elde edilir (Denklem 5).

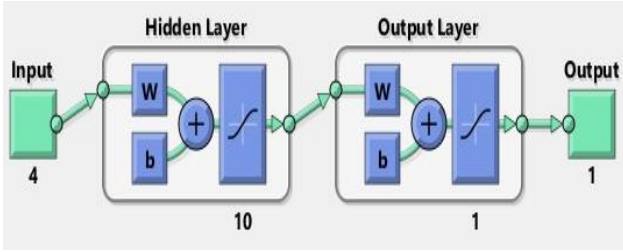
$$X_{max}^{STN,FUT} = a_1 * \left[\frac{X_{max}^{GCM,FUT} - b_2}{a_2} \right] + b_1 \quad (5)$$

- Son adımda ise Denklem (5)'ten elde edilen ayrıştırılmış veriler ile gumbel dağılımına göre geleceğe yönelik IDF eğrileri çizilir [30].

5 Yapay sinir ağları ile ayrıştırma (ANN)

Yapay sinir ağları, sinir hücrelerinin doğal biyolojik karşılıklarından esinlenerek oluşturulan matematiksel modellerdir. Bu modeller, karmaşık problemleri çözmek ve

desenleri tanımak için kullanılır. Yapay sinir ağları, birçok katmandan oluşur ve her katmanda sinir hücreleri bulunur. Bu sinir hücreleri, verileri işler ve bir sonraki katmana ileterek nihai çıktıyı üretir. Yapay sinir ağları, öğrenme süreciyle eğitilir ve deneyimlerden bilgi çıkararak performansını geliştirir. Bu ağlar, sınıflandırma, regresyon, desen tanıma ve tahmin gibi birçok görevde başarılı sonuçlar verir. Yapay sinir ağları, bilgisayar biliminde ve yapay zeka araştırmalarında önemli bir rol oynar ve karmaşık problemleri çözmek için güçlü bir araç olarak kabul edilir. Bu çalışmadaki ikinci metot olarak kullanılan yapay sinir ağları aracılığı ile girdi olarak 1, 6, 12, 24 saatlik gözlemlenmiş yağış verileri kullanıldı. Tahmin edilmesi istenen standart süreler ise 5, 10, 15, 30 dk oldu. Model için Sigmoid transfer fonksiyonuna sahip iki katmanlı bir ileri beslemeli model kullanılmıştır. Modelin geliştirilmesi için Lavenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Kullanılan ann yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir.



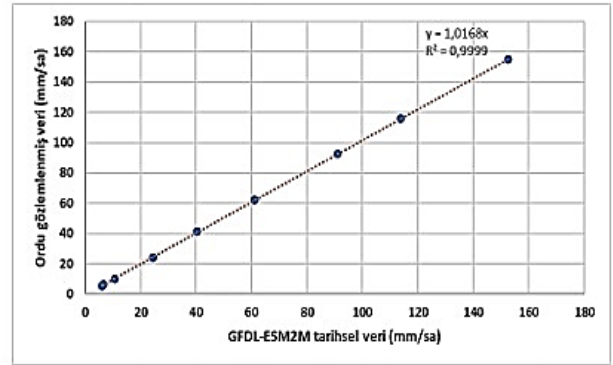
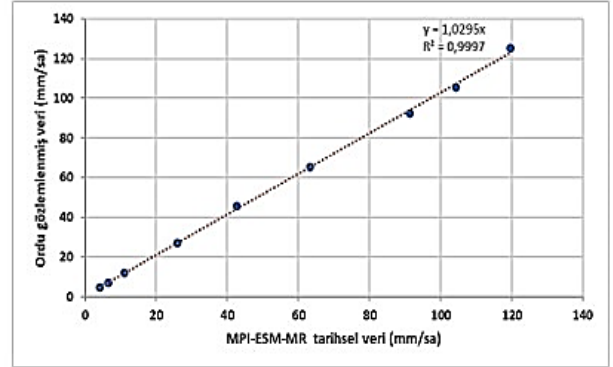
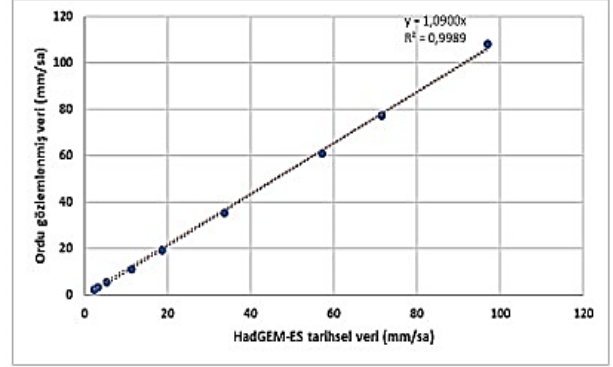
Şekil 3. ANN yapısı

6 Bulgular ve tartışma

Çalışmada ilk olarak 1971-2000 yılları arasındaki gözlemlenen tarihsel veri setleri ile aynı döneme ait iklim modellerinin tarihsel verileri, iklim modellerine ait günlük yağış verilerini daha kısa süreli yağış verilerine indirgeyerek IDF eğrilerini güncellemek için kullanılan eşdeğer kuantil eşleştirme yönteminin uygunluğunu belirlemek amacıyla kullanıldı. İkinci adım olarak yapay sinir ağları ile gözlemlenmiş 1, 6, 12, 24 saatlik maksimum yağış verileri aracılığı ile 5, 10, 15, 30 dk'lık yağış verileri tahmin edilmeye çalışıldı. Her iki metodunda geleceğe yönelik IDF eğrileri elde etmek için gerekli olan yağış verilerini türetmedeki başarısı test edilmeye çalışılarak yağış verisi ayrıştırma hangi metodu daha iyi olduğu ve metotların kullanımını açısından avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar belirlenmeye çalışıldı.

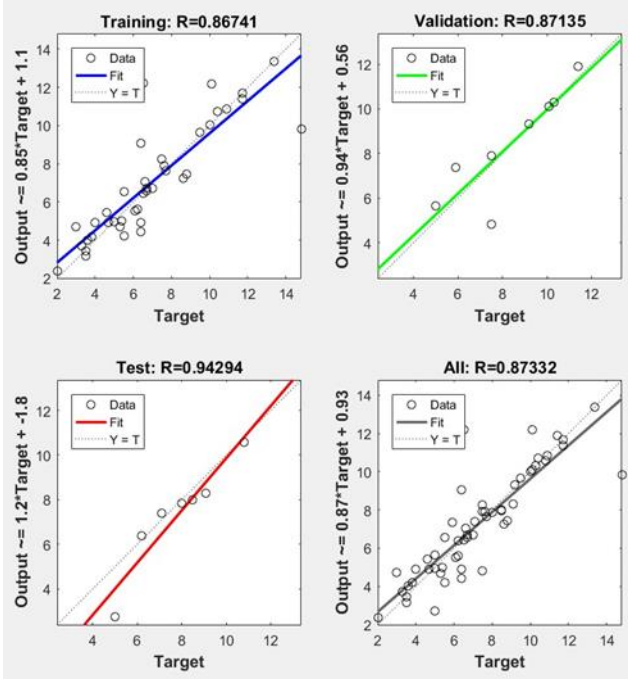
Şekil 4'te görüldüğü üzere eşdeğer kuantil eşleştirme metodu ile ayrıştırılan yağış verilerinin gözlemlenmiş yağış verileri ile yüksek bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu sebepten ötürü geleceğe yönelik IDF eğrilerinin oluşturulmasında EQM'nin kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmıştır. EQM yönteminin bir avantajı, veri dönüşümüne ihtiyaç duymamasıdır. Başlangıç veri setini değiştirmeden sadece eşleştirme işlemi yaparak istatistiksel analiz yapma imkânı sunar. Bu, veri bütünlüğünün korunmasını sağlar ve analiz sürecini kolaylaştırır. EQM yöntemi, örneklem büyüklüğünün dağılım eşleştirmesine olan etkisini azaltır. Bu da demektir ki küçük örneklerle bile etkili sonuçlar elde edilebilir. Bu özelliği sayesinde EQE yöntemi, veri sınırlılıkları nedeniyle kısıtlı örneklerle

çalışan araştırmacılar için ideal bir seçenek olabilmektedir. Özetle, EQM yöntemi, dağılım eşleştirmesi için kullanışlıdır çünkü iki değişken arasındaki dağılımı eşleştirir, veri dönüşümü gerektirmez ve örneklem büyüklüğüne duyarlıdır.



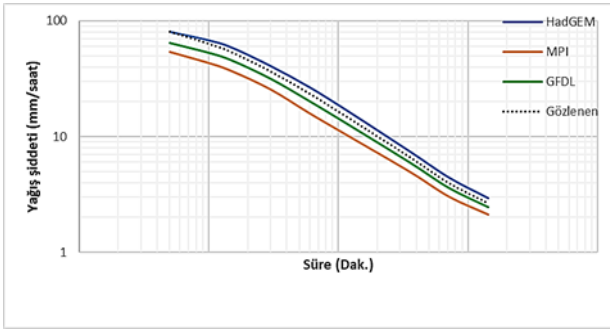
Şekil 4. Yukarıdan aşağıya doğru sırası ile HadGEM-ES, MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M modellerinin ayrıştırılmış T=10 yıl periyotlu yağış verileri ile Ordu ilinin gözlemlenmiş verilerinin karşılaştırılması

Yapay sinir ağları ile 1, 6, 12, 24 saatlik gözlemlenmiş veriler ile 30 dk'lık yağış verilerinin tahmin edilmesi üzerine yapılan analizler sonucu iyiye yakın sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5). Fakat yapay sinir ağları ile elde edilen verilerde, EQM ile elde edilen yüksek başarının benzeri elde edilememiştir. Yapay sinir ağları öğrenme ve kullandığı verinin azlık veya çokluğuna göre sonuçları değişmektedir. Bu özelliği ile EQM'den dezavantajlı duruma geçmektedir. EQM'nin yapay sinir ağlarına göre daha avantajlı olması, pratikliği açısından çalışmadaki tüm bulgular EQM ile elde edilmiştir.



Şekil 5. Yapay sinir ağları ile 30 dk'lık yağış verisinin elde edilmesine ait test sonuçları

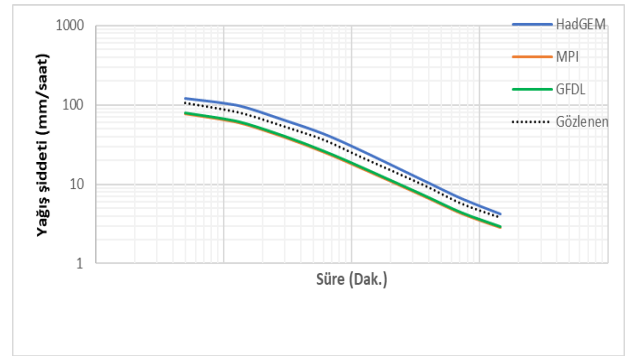
Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de görüldüğü üzere HadGEM-ES modeline göre yağışlarda artış olduğu, GFDL-ESM2M ve MPI-ESM-2M modellerine göre ise azalış olduğu, MPI modeline göre azalışın GFDL’den fazla olduğu görülmektedir.



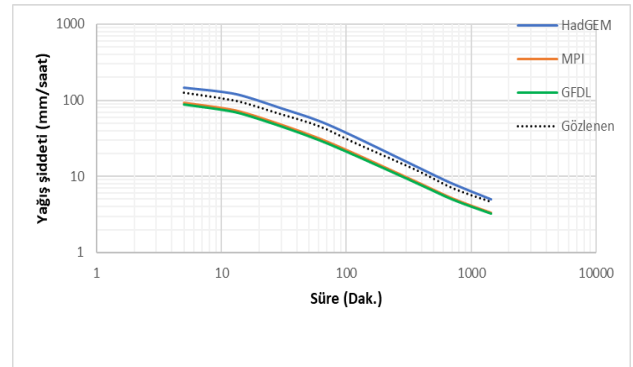
Şekil 6. T=2 yıl periyodu için RCP8.5 senaryosuna göre elde edilmiş yağış tahminlerinin gözlem değerleriyle karşılaştırılması

Elde edilen bulgulara göre T=2 yıl periyodunda HadGEM modeline göre %5-15 aralığında yağışların arttığı, MPI modeline göre %33-50 aralığında yağışların azaldığı, GFDL modeline göre ise %8-22 aralığında yağışların azaldığı görülmektedir (Şekil 9). T=5 yıl periyodunda HadGEM modeline göre %16-24 aralığında yağışların arttığı, MPI modeline göre %20-38 aralığında yağışların azaldığı, GFDL modeline göre ise %16-34 aralığında yağışların azaldığı görülmektedir (Şekil 10). T=10 yıl periyodunda HadGEM modeline göre %20-30 aralığında yağışların arttığı, MPI modeline göre %14-37 aralığında yağışların azaldığı, %20-43 aralığında yağışların azaldığı görülmektedir (Şekil 11). Son yıllara bakıldığında Ordu

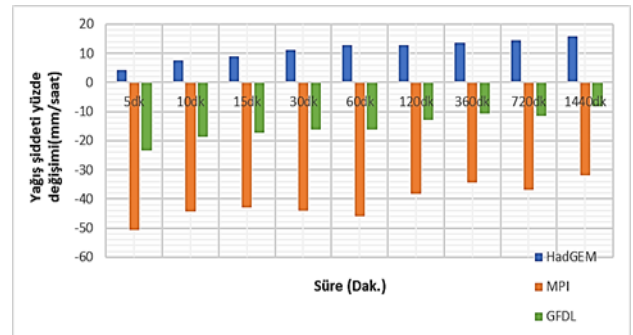
ilinde birçok taşkın olayı meydana geldiği görülmüştür. 7 Temmuz 2023 tarihinde aşırı yağışlardan kaynaklı olarak Bülbül Deresi’nde taşkınlar meydana geldiği, taşkın sebebi ile ciddi hasarlar olduğu görülmüştür [31]. 18 Temmuz 2022 tarihinde ise Ordu’nun Fatsa ilçesinde Ilıcalı Deresi’nde meydana gelen taşkın sonrası iş yerlerini ve çoğu evi su basmıştır [32]. Son yıllarda Ordu ilinde meydana gelen bu taşkınlar göz önünde bulundurulduğunda Ordu ilinin yağış durumunun HadGEM-ES modeli ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada elde edilen bulgular incelendiğinde literatürdeki çalışmalara benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür [33-35].



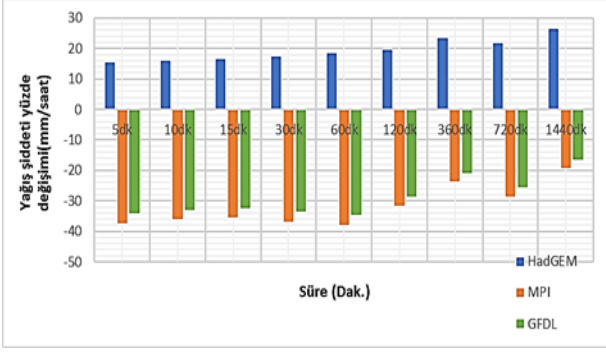
Şekil 7. T=5 yıl periyodu için RCP8.5 senaryosuna göre elde edilmiş yağış tahminlerinin gözlem değerleriyle karşılaştırılması



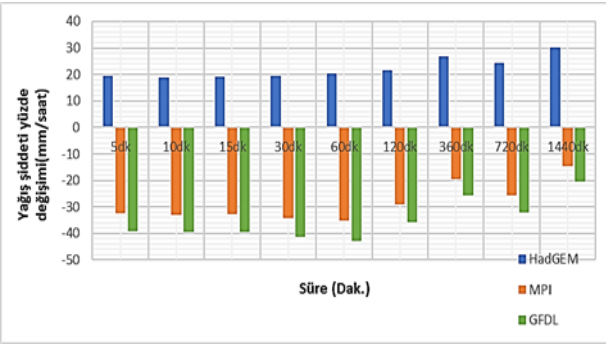
Şekil 8. T=10 yıl periyodu için RCP8.5 senaryosuna göre elde edilmiş yağış tahminlerinin gözlem değerleriyle karşılaştırılması



Şekil 9. T=2 yıl periyodu için RCP8.5 senaryosuna göre elde edilmiş yağış tahminlerinin gözlem değerleriyle % değişimi olarak karşılaştırılması



Şekil 10. T=5 yıl periyodu için RCP8.5 senaryosuna göre elde edilmiş yağış tahminlerinin gözlem değerleriyle % değişimi olarak karşılaştırılması



Şekil 11. T=10 yıl periyodu için RCP8.5 senaryosuna göre elde edilmiş yağış tahminlerinin gözlem değerleriyle % değişimi olarak karşılaştırılması

7 Sonuçlar

İklim değişikliği, dünya çapında ciddi bir sorun olarak kabul edilmektedir. Bilimsel kanıtlar, atmosferdeki sera gazlarının artışının, küresel sıcaklık artışına ve iklim sistemlerindeki önemli değişikliklere yol açtığı göstermektedir. Bu nedenle, iklim değişikliğiyle mücadele etmek ve etkilerini hafifletmek, büyük önem taşımaktadır. Bu nedenlerle, iklim değişikliğiyle mücadele etmek ve etkilerini azaltmak için küresel olarak birçok çalışma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada da özellikle su yapılarını projelendirilmesinde büyük öneme sahip olan IDF eğrileri üzerinde durulmuştur. Mevcut gözlem verilerine dayalı IDF eğrilerinin geleceğe yönelik iklim değişikliğini yansıtabilen özellikte olmaması, IDF eğrilerinin güncellenmesi durumunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada da IDF eğrilerinin geleceğe yönelik tahminleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda HadGEM-ES modeline göre Ordu ilinin yağışlarının artacağı, MPI-ESM-MR ve GFDL-ESM2M modellerine göre ise yağışların azalacağı sonucu çıkmıştır. Bir başka deyişle HadGEM modeline göre şehrin su altyapısını yetersiz kalacağı, diğer modellere göre ise şehrin su altyapısının yeterli olduğu ve herhangi bir taşkına sebebiyet verecek durumun olmadığı sonuçlarına varılmıştır. Son yıllarda Ordu'da meydana gelen taşkınlar sebebi ile modellerden HadGEM modelinin Ordu ilinin su yapılarının tasarımı için diğer modellere göre daha uygun bir model olduğu görülmüştür. Küresel iklim modellerinin içerdiği parametrelerin ve hesap tekniklerinin farklı olmasından

kaynaklı her modelin farklı sonuçlar verdiği ayrıca görülmüştür. Herhangi bir çalışma yapılacak alandan elde edilen sonuçlar incelendiğinde tehlike arz edebilecek yani taşkın olma durumuna göre mühendislik çalışmalarının yapılması önerilmektedir. Çalışmada elde edilen verilerin çeşitli kurumların yapacağı uygulama çalışmalarında ve bu konu ile alakalı akademik çalışmalara destek vereceği umulmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] J. T. S. Pedersen, D. van Vuuren, J. Gupta, F. D. Santos, J. Edmonds, and R. Swart, IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022?. *Global Environmental Change*, 75, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102538>
- [2] D. de Haas and J. Andrews, Nitrous oxide emissions from wastewater treatment - Revisiting the IPCC 2019 refinement guidelines. *Environmental Challenges*, 8, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100557>
- [3] J. P. Palutikof et al., Enhancing the review process in global environmental assessments: The case of the IPCC, *Environ Sci Policy*, 139, 118–129, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.10.012>
- [4] C. Howarth and D. Viner, Integrating adaptation practice in assessments of climate change science: The case of IPCC Working Group II reports, *Environ Sci Policy*, 135, 1–5, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.009>
- [5] S. Colombini et al., Evaluation of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) equations to predict enteric methane emission from lactating cows fed Mediterranean diets, *JDS Communications*, 2023. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0240>
- [6] F. Gogien, M. Dechesne, R. Martinerie, and G. Lipeme Kouyi, Assessing the impact of climate change on Combined Sewer Overflows based on small time step future rainfall timeseries and long-term continuous sewer network modelling. *Water Res*, 230, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.037>
- [7] A. D. Polasky, J. L. Evans, and J. D. Fuentes, CCdownscaling: A Python package for multivariable statistical climate model downscaling. *Environmental Modelling & Software*, 165, 105712, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105712>
- [8] T. A. Demissie, Impact of climate change on hydrologic components using CORDEX Africa climate model in Gilgel Gibe 1 watershed Ethiopia. *Heliyon*, 9(6), 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16701>
- [9] E. Sá et al., Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal. *Atmos Environ*, 131, 209–224, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.040>
- [10] C. Klausbruckner, H. Annegarn, L. R. F. Henneman, and P. Rafaj, A policy review of synergies and trade-

- offs in South African climate change mitigation and air pollution control strategies. *Environ Sci Policy*, 57, 70–78, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.12.001>
- [11] F. J. Sierro et al., Phase relationship between sea level and abrupt climate change. *Quat Sci Rev*, 28(25-26), 2867–2881, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.07.019>
- [12] T. Bardají et al., Sea level and climate changes during OIS 5e in the Western Mediterranean. *Geomorphology*, 104(1-2), 22–37, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.027>
- [13] Z. Duan, Impact of climate change on the life cycle greenhouse gas emissions of cross-laminated timber and reinforced concrete buildings in China. *J Clean Prod*, 395, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136446>
- [14] C. Franco et al., Key predictors of greenhouse gas emissions for cities committing to mitigate and adapt to climate change. *Cities*, 137, 104342, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103044>
- [15] M. M. Ismail, I. Dincer, Y. Bicer, and M. Z. Saghir, Effect of using phase change materials on thermal performance of passive solar greenhouses in cold climates. *International Journal of Thermofluids*, 19, 100380, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100380>
- [16] S. Ferrier, T. D. Harwood, C. Ware, and A. J. Hoskins, A globally applicable indicator of the capacity of terrestrial ecosystems to retain biological diversity under climate change: The bioclimatic ecosystem resilience index. *Ecol Indic*, 117, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106554>
- [17] A. C. de Souza and J. A. Prevedello, Climate change and biological invasion as additional threats to an imperiled palm. *Perspect Ecol Conserv*, 19(2), 216–224, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.02.003>
- [18] S. Worischka, F. Schöll, C. Winkelmann, and T. Petzoldt, Twenty-eight years of ecosystem recovery and destabilisation: Impacts of biological invasions and climate change on a temperate river. *Science of the Total Environment*, 875, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.424>
- [19] A. K. Alhamid, M. Akiyama, H. Ishibashi, K. Aoki, S. Koshimura, and D. M. Frangopol, Framework for probabilistic tsunami hazard assessment considering the effects of sea-level rise due to climate change. *Structural Safety*, 94, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102152>
- [20] N. Spencer, E. Strobl, and A. Campbell, Sea level rise under climate change: Implications for beach tourism in the Caribbean. *Ocean Coast Manag*, 225, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106207>
- [21] X. Yu, L. Luo, P. Hu, X. Tu, X. Chen, and J. Wei, Impacts of sea-level rise on groundwater inundation and river floods under changing climate. *J Hydrol (Amst)*, 614, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.051>
- [22] S. Létourneau et al., Climate change and health in medical school curricula: A national survey of medical students' experiences, attitudes and interests. *Journal of Climate Change and Health*, 11, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2023.100226>
- [23] J. Alford, A. Massazza, N. R. Jennings, and E. Lawrance, Developing global recommendations for action on climate change and mental health across sectors: A Delphi-style study. *The Journal of Climate Change and Health*, 12, 100252, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2023.100252>
- [24] R. Alibudbud, Mental Health Service, Training, Promotion, and Research during Typhoons: Climate Change Experiences from the Philippines. *Asian J Psychiatr*, 103673, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ajp.2023.103673>
- [25] B. Lin and H. Zhao, Tracking policy uncertainty under climate change. *Resources Policy*, 83, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103699>
- [26] M. Chaikumbung, The effects of institutions and cultures on people's willingness to pay for climate change policies: A meta-regression analysis. *Energy Policy*, 177, 113513, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113513>
- [27] D. Furceri, M. Ganslmeier, and J. Ostry, Are climate change policies politically costly?. *Energy Policy*, 178, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113575>
- [28] S. Moghanlo et al., Using artificial neural networks to model the impacts of climate change on dust phenomenon in the Zanjan region, north-west Iran. *Urban Clim*, 35, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100750>
- [29] G. Liu, B. Powell, and T. Friedrich, Climate downscaling for regional models with a neural network: A Hawaiian example. *Prog Oceanogr*, 215, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103047>
- [30] R. K. Srivastav, A. Schar dong, and S. P. Simonovic, Equidistance quantile matching method for updating idfcurves under climate change. *Water Resources Management*, 28(9), 2539–2562, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0626-y>
- [31] Ordu'da sağanak sonrası taşkın (Flood after heavy rain in Ordu) <https://www.hurriyet.com.tr/video/orduda-saganak-sonrasi-taskin-42295881>, Accessed 14 July 2023
- [32] Ordu'da taşkın: Ev ve iş yerlerini su bastı (Flood in Ordu: Houses and workplaces flooded)<https://www.sozcu.com.tr/2022/gundem/orduda-dere-tasti-ev-ve-is-yerlerini-su-basti-7254892/> , Accessed 14 July 2023
- [33] H. Tayşi and M. Özger, Disaggregation of future GCMs to generate IDF curves for the assessment of urban floods. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 2022. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.241>
- [34] H. Gürkan, H. Arabaci, M. Demircan, O. Eskioğlu, S. Şensoy, and B. Yazici, GFDL-ESM2M Modeli temelinde RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre Türkiye için sıcaklık ve yağış projeksiyonları. *Coğrafi*

Bilimler Dergisi, 14(2), 77–88, 2016.
https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000174.
[35] M. Vrac et al., Dynamical and statistical downscaling
of the French Mediterranean climate: Uncertainty

assessment. *Natural Hazards and Earth System
Science*, 12(9), 2769–2784, 2012. [https://doi.org/
10.5194/nhess-12-2769-2012](https://doi.org/10.5194/nhess-12-2769-2012)





Simulating hydropower reservoir operations of the Yamula Dam with machine learning

Yamula Barajının hidroelektrik rezervuar işletiminin makine öğrenimi ile simülasyonu

Mustafa Şahin Doğan^{1,*} 

¹ Aksaray University, Department of Civil Engineering, 68100, Aksaray, Türkiye

Abstract

Large-scale reservoirs provide operational flexibility to water managers by storing water during times with higher surface water availability and releasing water when it is most needed. Most large-scale reservoirs serve for multipurpose demands, such as water supply for agricultural, urban and environmental users, hydropower, recreation, fisheries and transportation. Due to its low operating cost, hydropower generation is often maximized in energy systems with mixed hydro and thermal sources. Hydropower generation is also used to meet peak demand by advantage of operating in short notice. This study aims to simulate reservoir operations, including release schedule and hydropower operations of the Yamula Dam and hydropower plant using machine learning. Located on the Kızılırmak River, the Yamula Dam is a large-scale multipurpose reservoir with its 3476 million cubic meters of storage capacity. Turbine release decisions are learned with Random Forests algorithm using only reservoir inflow and upstream streamflow conditions. The developed model successfully predicts reservoir releases between 2006 and 2015, with a coefficient of determination value of 0.87. Model prediction results are provided, and then hydropower load, generation and revenue are calculated and results are presented. Based on simulation results, the Yamula Dam generates about 362.3 gigawatts hour of energy per year, with an annual average revenue of 14.1 million Dollars. With the developed model, reservoir operations under different upstream hydrological conditions can also be simulated.

Keywords: Reservoir operations, Water management, Hydropower, Machine learning, Random forests

1 Introduction

Small to large-scale reservoirs are used for a variety of purposes, such as water supply, flood mitigation, environmental protection, transportation, recreation, and hydropower. Reservoirs store water, and with their controlled releases, various demands, such as agricultural water demand during dry season or power demand during peak energy hours, are met [1]. Reservoirs store energy as higher-elevation water for hydropower. Power is produced

Öz

Büyük depolama kapasiteli rezervuarlar yüzey suyunun fazlaca bulunduğu zamanlarda suyu depolayarak ve su ihtiyacının en yüksek olduğu zamanlarda bu depolanan suyu sisteme vererek suyu yönetenlere işletim esnekliği sağlar. Büyük kapasiteli rezervuarlar çoğunlukla tarımsal, kentsel ve çevresel su ihtiyaçlarının temini, hidroelektrik, rekreasyon, balıkçılık ve ulaşım gibi birden çok amaca hizmet ederler. Düşük işletim maliyetinden dolayı hidroelektrik üretimi, hidro ve termik karışık enerji sistemlerinde genellikle maksimize edilir. Hidroelektrik üretim kısa sürede işleme alınma avantajından dolayı pik saatlerdeki talebi karşılamak için de kullanılır. Bu çalışma Yamula Barajı ve hidroelektrik santralinin türbin akış zamanlaması ve hidroelektrik operasyonlarını içeren rezervuar işletimini makine öğrenimini kullanarak simüle etmeyi amaçlamaktadır. Kızılırmak Nehri üzerinde yer alan Yamula Barajı 3476 milyon metreküp depolama kapasitesiyle birden çok amaca hizmet eden büyük ölçekli bir barajdır. Rastgele Karar Ormanları algoritması ile sadece rezervuara giren akım ve memba akım koşullarına göre türbin akımı kararları öğrenilmiştir. Geliştirilen model 2006 ve 2015 yılları arasındaki türbin akımlarını, 0.87 korelasyon katsayısı ile, başarılı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Model tahmini sonuçları gösterilmiş ve ayrıca hidroelektrik enerjisi üretimi ve getirisi hesaplanmış ve sonuçlar sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre Yamula barajı yılda yaklaşık 362.3 gigawatt saat enerji üretmekte ve 14.1 milyon dolar gelir sağlamaktadır. Geliştirilen model ile farklı memba hidrolojik durumlarına göre rezervuar işletim simülasyonları da yapılabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Rezervuar işletimi, Su yönetimi, Hidroelektrik, Makine öğrenimi, Rastgele karar ormanları

by the vertical flow of water using the potential energy difference, or ‘water head,’ between reservoir intake and tailwater levels. In a power system with mixed hydro-thermal production sources, hydropower generation is often maximized due to its lower operating cost than the majority of other power sources [2, 3]. Hydropower also offers operational flexibility by rapidly producing energy [4, 5] and by providing extra ancillary services, such as peak and frequency management, and spinning reserve [6].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: msahindogan@aksaray.edu.tr (M. Ş. Doğan)
Geliş / Recieved: 14.06.2023 Kabul / Accepted: 23.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1314793

The controlled reservoir releases, especially for hydropower generation, are highly dependent on decisions of reservoir operators rather than natural hydrological processes [7], while flood control may affect reservoir releases depending on reservoir storage and upstream flow conditions. Reservoir operating policy is either obtained from rule curves or from data-driven methods [8, 9]. Simulation models are commonly used for determining reservoir storage and release decisions [10], driven by prescribed operating rule curves [11, 12]. These reservoir operating rules depend on empirical relationship between reservoir storage and release, which can be derived from optimization models [12, 13]. While simulation models are helpful, reservoir operator's knowledge and experience are of great importance that sometimes operating rules need to be adapted to specific conditions, objectives or constraints [7, 11].

Data-driven methods, such as Machine Learning Algorithms (MLA) can extract the optimal decision information from operations to understand reservoir operator's release decisions under various conditions, such as specific month of a year, reservoir inflow or upstream flows. MLAs mathematically relate inputs and outputs without requiring explicit physical system representation [14]. Although MLAs are widely used to estimate streamflow [15-23] or forecast reservoir inflow [24-26], the number of studies on using MLAs to simulate reservoir operations is limited, especially for hydropower decisions. In literature, Yang et al. [7] simulated reservoir operations in California using decision trees and Random Forests algorithm. Khalil et al. [27] used Support Vector Machines for real-time management of reservoir releases. Gangrade et al. [28] employed Long-Short Term Memory for long-term reservoir operations. Qie et al. [29] compared different MLAs for simulating reservoir outflow and showed that MLAs are promising tools in reservoir management. Herman and Giuliani [30] used Decision Trees to obtain optimal reservoir operation policies. Özdoğan-Sarıkoç et al. [31] used several MLAs to forecast volumes of small reservoirs.

Data-driven reservoir simulation tools are useful tools for reservoir planners and operators, yet their developments are inadequate, especially for reservoirs in Turkey. This paper develops a model with Random Forests algorithm, one of commonly used MLAs, to simulate hydropower reservoir operations of the Yamula Dam and Hydroelectric Power Plant (HEPP), for a period between October 1, 2005 and September 30, 2015. The developed model is easy-to-use and depends only on reservoir inflow and upstream conditions to predict controlled reservoir releases. Hydropower load, generation and revenue calculated with predicted reservoir releases are presented. Specific objectives include:

- 1) Effectiveness of data-driven methods on simulating hydropower reservoir operations.
- 2) Use of Random Forests algorithm to learn and predict reservoir releases.
- 3) Input parameter selection to build a data-driven model.
- 4) Presenting a case study of the Yamula Dam operations with a comparison to observed values.

2 Material and methods

2.1 Study area

The Yamula Dam and HEPP is one of major reservoirs located on the Kızılırmak River near the city of Kayseri (Figure 1). The Yamula Dam is rock-filled with a clay core and has a volume of about 1.6 million cubic meters. The reservoir has a drainage area of about 15582 square kilometers [32]. Three stream gauge stations are identified to simulate the Yamula operations, shown in Figure 1. Station #1501 is located downstream of the dam, and its streamflow records represent reservoir releases. Station #1543 is located upstream of the dam, and its streamflow records are assumed to represent reservoir inflows. Station #1535 is located far upstream of the dam near the city of Sivas representing the upper basin conditions, whose records are used by the developed machine learning model along with other two stream gauge stations.

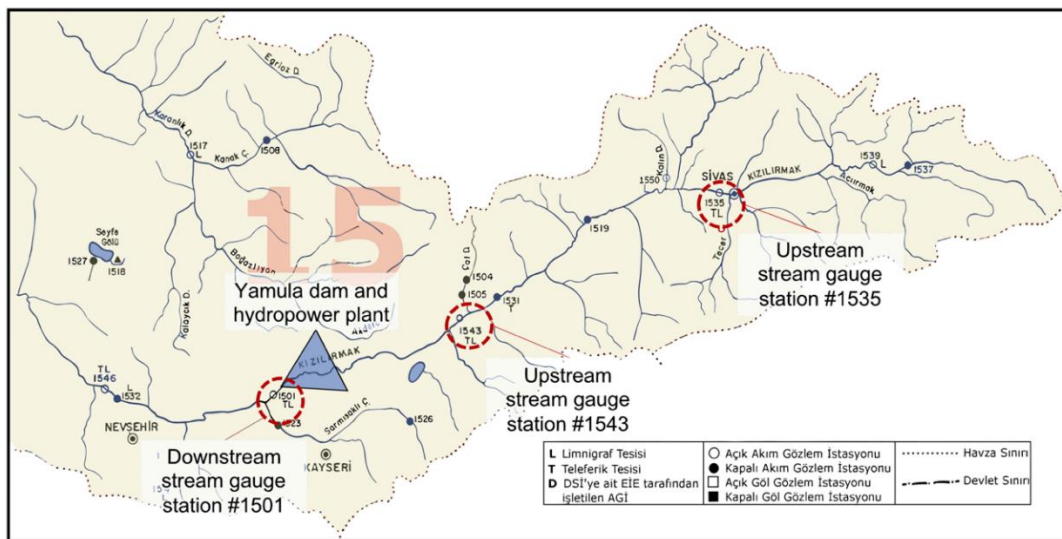


Figure 1. Study area: the Yamula Dam and HEPP and stream gauge stations (Image source: DSI [33]).

The Yamula Dam and HEPP is a multipurpose reservoir, including water supply for irrigation and urban users, hydropower generation and recreation. Table 1 shows characteristics of the reservoir and the hydroelectric power plant. The reservoir has a storage capacity of 3476 million cubic meters, 2025 million cubic meters of which is active storage, and has an area of 85.3 square kilometers. The Kızılırmak River at this location has an average natural flow of 67.7 cubic meters per second with annual average water volume of 2135 million cubic meters. The hydroelectric power plant has two Francis turbines with a total capacity of 100 megawatts (MW). The plant has a design head of 96.47 meters and overall efficiency of 0.85. The reliable power is estimated as 35.3 megawatts with an annual average reliable generation of 309.23 gigawatts hour (GWh) per year [32].

Table 1. The Yamula Dam and HEPP characteristics.

Plant characteristics	Value
Storage capacity (10^6 m^3)	3476
Total installed capacity (MW)	100
Average natural flow (m^3/s)	67.7
Net design head (m)	96.47
Overall efficiency	0.85
Reliable power (MW)	35.3
Reliable generation (GWh/year)	309.23

2.2 Streamflow Dataset

The dataset includes observed streamflow values from three stream gauge stations. The streamflow dataset is obtained from DSİ [33]. Target and input variables are derived from this streamflow dataset. In this study, the target variable is Yamula Dam daily outflows ($Q_{1501,d}$) measured

at streamflow station #1501, and 18 input variables are used to predict this target variable. Input variables and their data range, mean (μ) and standard deviation (σ) are shown in Table 2. These input variables are day of a month (T_d), month of a year (T_m), year (T_y), water year (T_{wy}), daily ($Q_{1543,d}$), monthly maximum ($Q_{1543,m,max}$), monthly average ($Q_{1543,m,mean}$), monthly minimum ($Q_{1543,m,min}$), water year maximum ($Q_{1543,wy,max}$), water year mean ($Q_{1543,wy,mean}$) and water year minimum ($Q_{1543,wy,min}$) of streamflow station #1543, and daily ($Q_{1535,d}$), monthly maximum ($Q_{1535,m,max}$), monthly average ($Q_{1535,m,mean}$), monthly minimum ($Q_{1535,m,min}$), water year maximum ($Q_{1535,wy,max}$), water year mean ($Q_{1535,wy,mean}$) and water year minimum ($Q_{1535,wy,min}$) of streamflow station #1535.

2.3 Random Forests machine learning model

Random Forests (RF) is one of machine learning algorithms designed for classification and regression problems proposed by Breiman [34] and commonly used in hydrology and water resources [7]. The key concept of the RF algorithm is that it combines ensemble approach with a random selection of decision variables [24]. Different from Artificial Neural Networks, the RF is a nonparametric, whitebox classification and regression algorithm [24]. The RF algorithm also has lower runtime and less prediction error for water resources problems compared to other machine learning algorithms, such as Extreme Gradient Boosting, Support Vector Regressor and Artificial Neural Networks [7, 23].

Table 2. Input variables of the training and test sets for the period from October 1, 2005 to September 30, 2015.

Input variable	Data range	μ	σ
T_d	[1, 31]	-	-
T_m	[1, 12]	-	-
T_y	[2005, 2015]	-	-
T_{wy}	[2006, 2015]	-	-
$Q_{1543,d} (\text{m}^3/\text{s})$	[1.3, 546]	55.9	67.4
$Q_{1543,m,max} (\text{m}^3/\text{s})$	[8.7, 546]	91.2	108.4
$Q_{1543,m,mean} (\text{m}^3/\text{s})$	[11.2, 166.8]	55.9	50.7
$Q_{1543,m,min} (\text{m}^3/\text{s})$	[1.3, 175]	34.2	38.5
$Q_{1543,wy,max} (\text{m}^3/\text{s})$	[70.6, 546]	323	138.2
$Q_{1543,wy,mean} (\text{m}^3/\text{s})$	[19.4, 83.8]	55.9	19.3
$Q_{1543,wy,min} (\text{m}^3/\text{s})$	[1.3, 14.7]	7.7	4
$Q_{1535,d} (\text{m}^3/\text{s})$	[2.4, 301]	33.3	41.8
$Q_{1535,m,max} (\text{m}^3/\text{s})$	[4.9, 301]	57.8	70.1
$Q_{1535,m,mean} (\text{m}^3/\text{s})$	[6.4, 102.1]	33.3	31.4
$Q_{1535,m,min} (\text{m}^3/\text{s})$	[2.4, 91.8]	20	22.3
$Q_{1535,wy,max} (\text{m}^3/\text{s})$	[34.1, 301]	206	78.4
$Q_{1535,wy,mean} (\text{m}^3/\text{s})$	[9.6, 45.4]	33.2	10.8
$Q_{1535,wy,min} (\text{m}^3/\text{s})$	[2.4, 6.2]	4.6	1
Target variable			
$Q_{1501,d} (\text{m}^3/\text{s})$	[0.4, 176]	50.5	30.4

Therefore, RF is employed in this study for release schedule prediction. Similar to other machine learning algorithms, RF operates based on relationship between input and target variables. For regression problems, the machine learning model is trained and tested on a historical dataset and predictions are made for periods where target variable data are assumed unavailable. In the RF algorithm, many binary regression decision trees are randomly grown and ensemble average is taken for the final decision. Binary decision trees operate based on true or false decisions. Input variables are compared to split thresholds, and if comparison decision is true, then the left side, if false, then the right side of the tree branch is followed [23]. For each decision tree, optimal splits in the set of input variables are determined [35]. The optimal split point (j) minimizes the mean squared error, expressed in Equation (1).

$$\min_{k,j} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{observed} - y_{predicted})^2 \quad (1)$$

where $y_{observed}$ is observed value, $y_{predicted}$ is predicted value, k is split variable and n is the length of training set.

The number of trees in ensemble and maximum tree depth are calibrated hyper parameters for RF algorithms. The number of trees determines the size of forest and tree depth determines the size and branches of each individual tree. Having larger trees and forest sizes are preferred, however after a certain point, they do not improve results and increase runtime. Figure 2 shows calibrated hyper parameters that minimize root mean squared error. Calibrated parameters are as follows: the number of trees is 30 and maximum tree depth is 15.

The streamflow dataset covers the period from October 1, 2005 to September 30, 2015. 70% of the historical data is used to train, and remaining 30% is used to test and validate the developed RF model. Thus, the test set, consisting of observed reservoir releases, is randomly selected and unseen by the model. Figure 3 compares the predicted and observed reservoir releases of the test set. The model better predicts especially high reservoir releases, while some low releases are overpredicted between 0 and 25 m^3/s . This is partly because only upstream conditions are used as inputs. Large releases occur during wet times, which can be learned by the model from upstream records. Overall, the coefficient of

determination r^2 (Equation (2)) value of 0.87 highlights the successful prediction capability of the developed model.

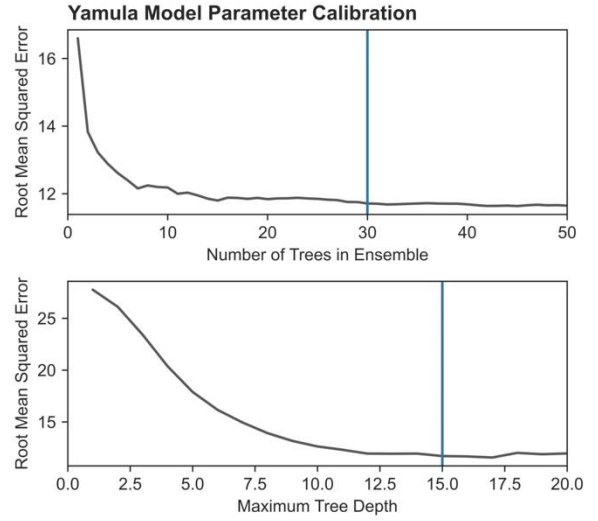


Figure 2. Model hyper parameter calibration.

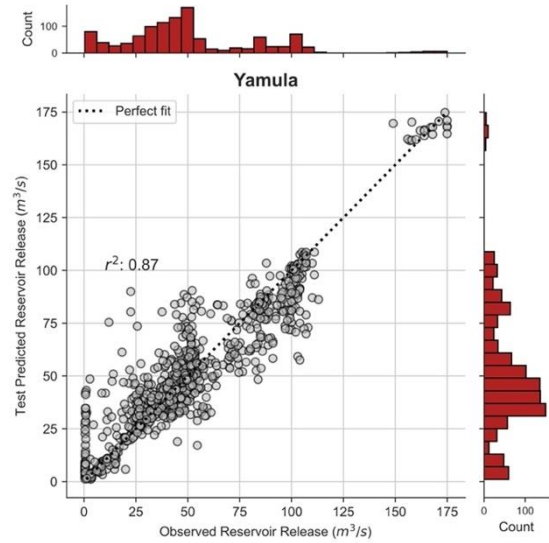


Figure 3. Test predicted and observed reservoir release (m^3/s) comparison for model validation with 30% of randomly selected and withheld data.

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_{observed,i} - \mu_{observed})(y_{predicted,i} - \mu_{predicted})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{observed,i} - \mu_{observed})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{predicted,i} - \mu_{predicted})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

where $y_{observed}$ is observed value, $\mu_{observed}$ is the mean of observed test set, $y_{predicted}$ is predicted value, and $\mu_{predicted}$ is the mean of predicted set.

3 Results and discussion

The Yamula Dam and HEPP operations are simulated between October 1, 2005 and September 30, 2015 at daily time-steps. Reservoir releases are predicted with Random Forests machine learning model. Using reservoir releases, power load, generation and revenue are calculated, and results are presented.

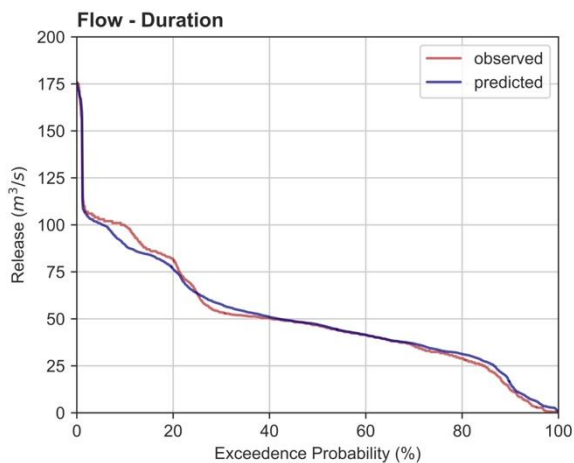
3.1 Reservoir release

Reservoir releases are predicted with the developed RF machine learning model and compared to observed releases of the Yamula dam, shown in Figure 4. The model slightly underpredicts high releases, and overpredicts low releases, as seen in the flow duration curves (Figure 4-a). This commonly occurs in RF predictions as taking ensemble average for the final decision reduces variance. However, daily release time-series are shown in Figure 4-b. The RF model is able to follow low and high release trends. Monthly and water year average releases are shown in Figure 4-c and Figure 4-d. Water year is between October 1 and September 30 of a given year. While differences between monthly and annual average predicted and observed releases are small, the

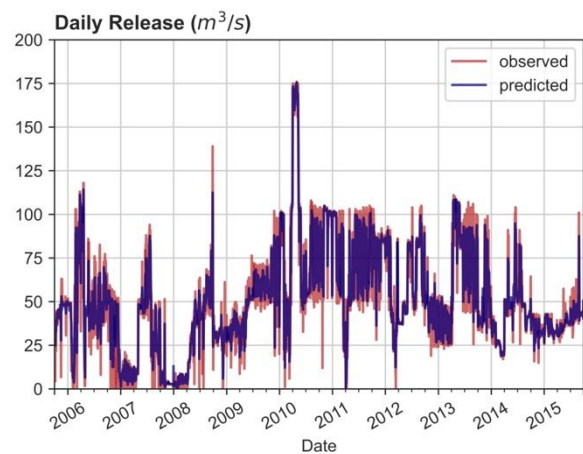
developed model tends to underpredict peak flows of May and June. Overall, the RF model can successfully predict reservoir releases given input conditions. As a typical large-scale reservoir, The Yamula stores water during wet months and releases mostly during dry months, between April and September, when demand is high. While releasing water, hydropower energy is generated, considering peak energy demand hours in a given day.

3.2 Power load and generation

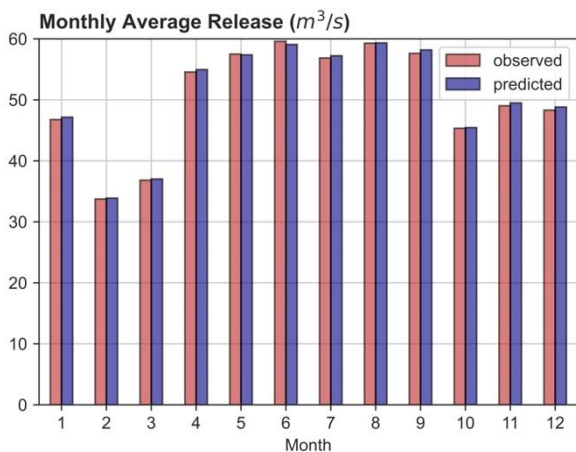
Hydropower is generated from vertical movement of water. Intakes divert water into penstocks, and water flow through turbines generate energy. The amount of power to be generated P depends on turbine discharge Q and water head H , which is a potential energy difference between intakes and tailwater (Equation (3)). The water head of the Yamula dam changes between 74.4 m and 105.5 m, depending on reservoir storage. Water head can be represented as a time dependant function of reservoir storage, however, due to lack of data availability, the constant net design head of 96.47 m is used in calculations.



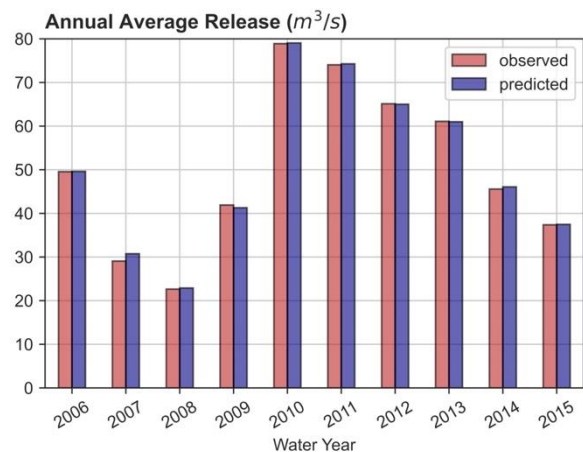
(a) Flow-duration curve of daily releases



(b) Daily time-series of releases



(c) Monthly average releases



(d) Annual average releases

Figure 4. Predicted and observed reservoir releases (m^3/s) of Yamula between 1/10/2005 and 30/09/2015.

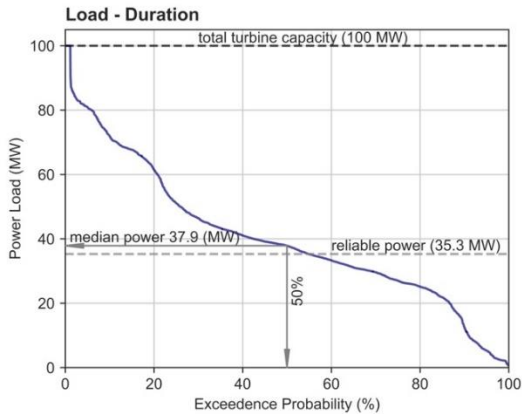
There are also other constant parameters that affect power, which are plant efficiency η , density of water ρ , and gravitational constant g . Integrating power over time t yields generation G , and multiplying generation with wholesale energy prices p results in hydropower revenue, shown in Equation (4) and Equation (5), respectively.

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q(t) \cdot H \quad (3)$$

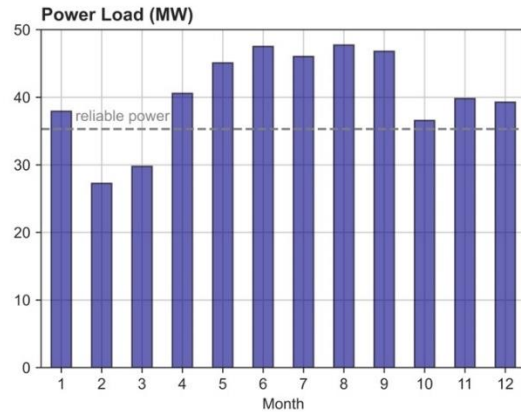
$$G = \eta \cdot \rho \cdot g \int_0^T Q(t) \cdot H \cdot dt \quad (4)$$

$$R = p \cdot \eta \cdot \rho \cdot g \int_0^T Q(t) \cdot H \cdot dt \quad (5)$$

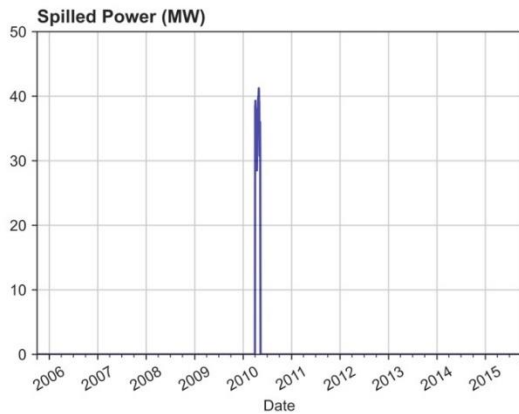
where P is power (W), G is generation (Wh), R is revenue (\$), η is overall plant efficiency, ρ is density of water (kg/m^3), g is gravitational constant (m/s^2), Q is release (m^3/s), H is water head (m), T is time (hour), and p is wholesale energy market price (\$/Wh).



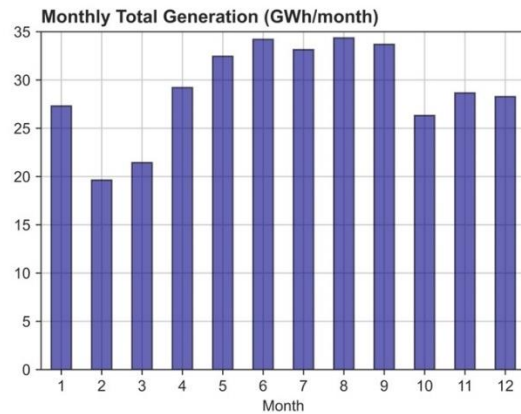
(a) Probability exceedance of daily power (MW)



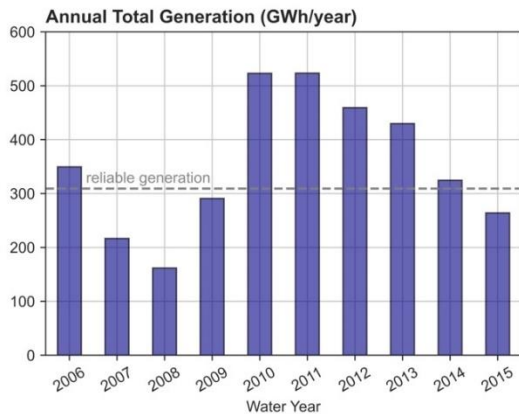
(b) Monthly average power (MW)



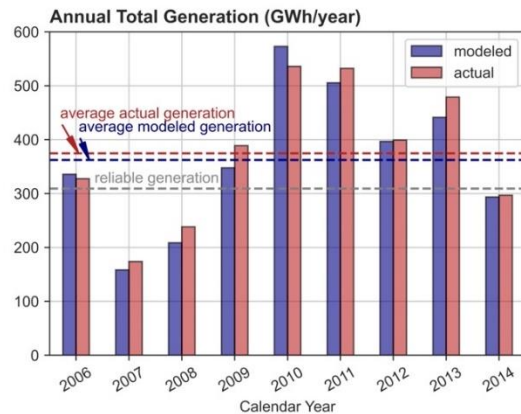
(c) Spilled power (MW)



(d) Monthly average hydropower generation (GWh/month)



(e) Annual total hydropower generation (GWh/year) by water year

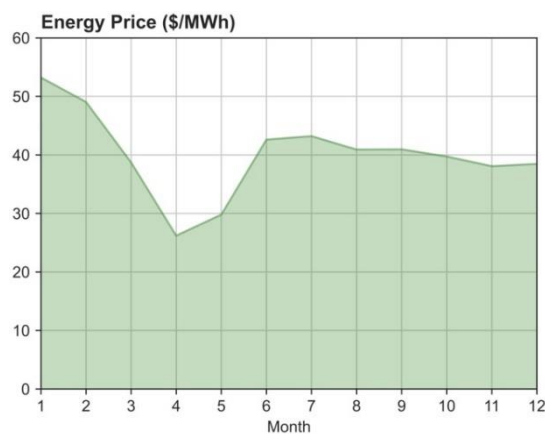


(f) Annual total hydropower generation (GWh/year) by calendar year

Figure 5. Power (MW) and generation (GWh) between 1/10/2005 and 30/09/2015.

Figure 5 shows probability the distribution of daily power load, monthly average power, spilled power, and monthly and annual average hydropower generations with a comparison to actual annual average generation. The Yamula has two turbines with a combined capacity of 100 MW. The plant hits that capacity during only less than 1% of days in a ten-year period between October 1, 2005 and September 30, 2015. Reliable power load of the plant (35.3 MW) is slightly less than median power load (37.6 MW), corresponding to 50% exceedance probability (Figure 5-a). Monthly average power load is higher in April through September, as a result of high releases during these months. The peak power load of 47 MW is observed in June and August. Except for February and March, the monthly average power load is greater than reliable power in all other months (Figure 5-b). During the modeled period between October 1, 2005 and September 30, 2015, the reservoir spills between April 1 and May 11, 2010. This is because, the upper Kızılırmak River basin received 100% more precipitation than normal in 2010 water year [36]. Spills are not desired in hydropower reservoir operations, since hydropower is not generated when water flows through spillways instead of turbines. Due to spilling, power load between 30 to 40 MW in April and May of 2010 is lost

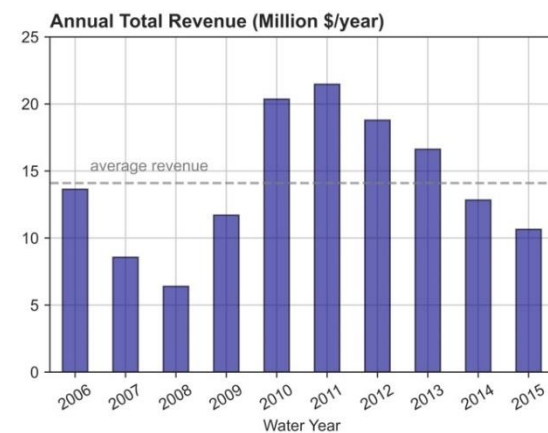
(Figure 5-c). Following a similar trend as power load, monthly total generation is higher in April through September because of scheduled irrigation and water supply deliveries. Monthly total generation is lower in February and March since water demand and wholesale energy prices are low in these months (Figure 5-d). Between 2006 and 2015 water years, annual total hydropower generations in 2006, and 2010 through 2014 water years are higher than annual total reliable generation of 309.2 GWh/year. Annual total generation is less than reliable generation in remaining years (2007 through 2009, and 2015), shown in Figure 5-e. Peak annual total generations of 522.6 and 525.3 GWh/year are observed in water years 2010 and 2011, respectively. Calendar year total annual modeled generation is compared to actual generation in Figure 5-f. A calendar year is between January 1 and December 31. Actual annual total generation is obtained from Enerji Atlası [37]. Except for years 2006 and 2010, modeled annual total generation is slightly greater than actual generation. Assumptions, such as constant head and constant efficiency, can result in these differences. Nonetheless, annual average modeled generation of 362.3 GWh/year is close to annual average actual generation of 374.7 GWh/year between 2006 and 2014.



(a) Monthly average wholesale energy prices (\$/MWh)



(b) Monthly total hydropower revenue (million \$/month)



(c) Annual total hydropower revenue (million \$/year)

Figure 6. Monthly average wholesale energy prices (a), monthly average (b) and annual total hydropower revenue (c).

3.3 Revenue

Hydropower revenue is obtained from the sale of generated energy in an energy market. Revenue is calculated by multiplying generation with wholesale energy prices. Energy prices can be determined in a deregulated energy market or based on fixed contract prices between retailers and generators. Monthly average energy prices of the year 2020 in \$/MWh are gathered from EPIAŞ [38], shown in (Figure 6-a). Wholesale energy prices peak in January and remain lower April and May, when energy generation from relatively cheaper run-of-river hydropower plants reduces energy prices. Monthly and annual total hydropower revenue is calculated using 2020 energy prices (Figure 6-b and Figure 6-c). Peak monthly total hydropower revenue of about 1.4 million \$ is obtained in January, when energy prices peak. Monthly revenue is also high in June through September with greater generation and also energy prices. The lowest monthly total revenue (0.77 million \$) occurs in April, while the lowest hydropower generation is in February. The water year of 2008 has the lowest annual release and hydropower generation since it was a drought year. The total revenue in this year is 6.4 million \$. While annual total generations in 2010 and 2011 are close, annual total revenue in 2011 water year (21.5 million \$) is noticeably greater than total revenue in 2010 (20.3 million \$). This is mostly because more hydropower is generated in months with higher energy prices in 2011 compared to 2010, resulting in higher annual total hydropower revenue. Annual average revenue between 2006 and 2015 is calculated as 14.1 million \$ per year.

4 Conclusions

Reservoir operations of the Yamula Dam and HEPP were modeled with Random Forests machine learning algorithm. Daily reservoir releases are predicted with various input variables derived from reservoir upstream and upper basin stream gauge stations. These variables include time components of date, and minimum, mean and maximum flows in a given month or year, in addition to daily stream gauge observations. With a coefficient of determination r^2 value of 0.87, the developed model successfully estimates reservoir releases. Then, power load, generation and revenue results with predicted reservoir releases are presented. The Yamula's median power load of 37.6 MW exceeds its reliable power load value of 35.3 MW. The hydropower plant generates annual average of about 362 GWh of energy per year, gaining a revenue of 14.1 million \$ per year. The developed simulation model is easy-to-use and requires minimal data. With only reservoir inflow and upstream streamflow dataset, the model makes controlled release predictions. The developed model also can be applied periods where input variables are known but reservoir releases unknown or to simulate different upstream conditions and their effects on hydropower reservoir operations of the Yamula. A similar methodology can also be applied to other reservoirs in order to learn their daily release schedules and simulate reservoir operation.

Conflict of interest

The authors declare there is no conflict.

Similarity rate (iThenticate): 6%

References

- [1] M. S. Dogan, Hydropower generation in the era of renewables and climate change. Ph.D. Thesis, University of California, Davis, California, USA, 2019.
- [2] K. Madani, M. Guégan and C. B. Uvo, Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California. *Journal of Hydrology*, 510,153-163, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.001>.
- [3] A. F. Hamlet, D. Huppert and D. P. Lettenmaier, Economic value of long-lead streamflow forecasts for Columbia River hydropower. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 (2), 91-101, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2002\)128:2\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:2(91)).
- [4] B. Chatterjee, R. E. Howitt and R. J. Sexton, The optimal joint provision of water for irrigation and hydropower. *Journal of Environmental Economics and Management*, 36 (3), 295-313, 1998. <https://doi.org/10.1006/jeem.1998.1047>.
- [5] P. Côté and R. Leconte, Comparison of stochastic optimization algorithms for hydropower reservoir operation with ensemble streamflow prediction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142 (2), 04015046, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000575](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000575).
- [6] J. Li, Y. Zhang, C. Ji, A. Wang and J. R. Lund, Large-scale hydropower system optimization using dynamic programming and object-oriented programming: the case of the Northeast China Power Grid. *Water Science & Technology*, 68 (11), 2458, 2013. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.528>.
- [7] T. Yang, X. Gao, S. Sorooshian and X. Li, Simulating California reservoir operation using the classification and regression-tree algorithm combined with a shuffled cross-validation scheme. *Water Resources Research*, 52 (3), 1626-1651, 2016. <https://doi.org/10.1002/2015WR017394>.
- [8] W. Zhang, H. Wang, Y. Lin, J. Jin, W. Liu and X. An, Reservoir inflow predicting model based on machine learning algorithm via multi-model fusion: A case study of Jinshuitan river basin. *IET Cyber-systems Robotics*, 3 (3), 265-277, 2021. <https://doi.org/10.1049/csy2.12015>.
- [9] Y. Liu, H. Qin, Z. Zhang, L. Yao, Y. Wang, J. Li, G. Liu and J. Zhou, Deriving reservoir operation rule based on Bayesian deep learning method considering multiple uncertainties. *Journal of Hydrology*, 579, 124207, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124207>.
- [10] A. J. Draper, A. Munévar, S. K. Arora, E. Reyes, N. L. Parker, F. I. Chung and L. E. Peterson, CalSim: Generalized model for reservoir system analysis.

- Journal of Water Resources Planning and Management, 130 (6), 480-489, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:6\(480\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:6(480)).
- [11] R. Oliveira and D. P. Loucks, Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research*, 33 (4), 839-852, 1997. <https://doi.org/10.1029/96WR03745>.
- [12] J. R. Lund and J. Guzman, Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125 (3), 143-153, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:3\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:3(143)).
- [13] T. Nelson, R. Hui, J. R. Lund and J. Medellín-Azuara, Reservoir operating rule optimization for California's Sacramento Valley. *San Francisco Estuary and Watershed Sciences*, 14 (1), 2016. <https://doi.org/10.15447/sfews.2016v14iss1art6>.
- [14] H. Chu, J. Wei, W. Wu, Y. Jiang, Q. Chu and X. Meng, A classification-based deep belief networks model framework for daily streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*, 595, 125967, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125967>.
- [15] L. E. Besaw, D. M. Rizzo, P. R. Bierman and W. R. Hackett, Advances in ungauged streamflow prediction using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 386 (1-4), 27-37, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.037>.
- [16] N. Noori and L. Kalin, Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 533, 141-151, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.050>.
- [17] T. R. Petty and P. Dhingra, Streamflow hydrology estimate using machine learning (SHEM). *Journal of the American Water Resources Association*, 54 (1), 55-68, 2018. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12555>.
- [18] R. M. Adnan, Z. Liang, S. Trajkovic, M. Zounemat-Kermani, B. Li and O. Kisi, Daily streamflow prediction using optimally pruned extreme learning machine. *Journal of Hydrology*, 577, 123981, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123981>.
- [19] Y. Li, Z. Liang, Y. Hu, B. Li, B. Xu and D. Wang, A multi-model integration method for monthly streamflow prediction: Modified stacking ensemble strategy. *Journal of Hydroinformatics*, 22 (2), 310-326, 2020. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.066>.
- [20] A. Kumar, R. Ramsankaran, L. Brocca and F. Muñoz-Arriola, A simple machine learning approach to model real-time streamflow using satellite inputs: Demonstration in a data scarce catchment. *Journal of Hydrology*, 595, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126046>.
- [21] Y. Lin, D. Wang, G. Wang, J. Qiu, K. Long, Y. Du, H. Xie, Z. Wei, W. Shangguan and Y. Dai, A hybrid deep learning algorithm and its application to streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 601, 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126636>.
- [22] W. Xu, J. Chen, X. J. Zhang, L. Xiong and H. Chen, A framework of integrating heterogeneous data sources for monthly streamflow prediction using a state-of-the-art deep learning model. *Journal of Hydrology*, 614, 128599, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128599>.
- [23] M. S. Dogan, Estimating streamflow of the Kızılırmak River, Turkey with single- and multi-station datasets using Random Forests. *Water Science & Technology*, 87 (11), 2742-2755, 2023. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.171>.
- [24] T. Yang, A. A. Asanjan, E. Welles, X. Gao, S. Sorooshian and X. Liu, Developing reservoir monthly inflow forecasts using artificial intelligence and climate phenomenon information. *Water Resources Research*, 53 (4), 2786-2812, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017WR020482>.
- [25] D. Zhang, J. Lin, Q. Peng, D. Wang, T. Yang, S. Sorooshian, X. Liu and J. Zhuang, Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm. *Journal of Hydrology*, 565, 720-736, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.050>.
- [26] Z. C. Herbert, Z. Asghar and C. Oroza, Long-term reservoir inflow forecasts: Enhanced water supply and inflow volume accuracy using deep learning. *Journal of Hydrology*, 601, 126676, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126676>.
- [27] A. Khalil, M. McKee, M. Kemblowski and T. Asefa, Sparse Bayesian learning machine for real-time management of reservoir releases. *Water Resources Research*, 41 (11), 1-15, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004WR003891>.
- [28] S. Gangrade, D. Lu, S. C. Kao and S. L. Painter, Machine learning assisted reservoir operation model for long-term water management simulation. *Journal of the American Water Resources Association*, 58 (6), 1592-1603, 2022. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13060>.
- [29] G. Qie, Z. Zhang, E. Getahun and E. A. Mamer, Comparison of machine learning models performance on simulating reservoir outflow: A case study of two reservoirs in Illinois, U.S.A. *Journal of the American Water Resources Association*, 59, 554-570, 2022. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13040>.
- [30] J. D. Herman and M. Giuliani, Policy tree optimization for threshold-based water resources management over multiple timescales. *Environmental Modelling & Software*, 99, 39-51, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.016>.
- [31] G. Özdoğan-Sarıkoç, M. Sarıkoç, M. Celik and F. Dadaser-Celik, Reservoir volume forecasting using artificial intelligence-based models: Artificial Neural Networks, Support Vector Regression, and Long Short-Term Memory. *Journal of Hydrology*, 616, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128766>.
- [32] Ayan Enerji, Yamula Hidro Elektrik Santrali. <https://www.ayen.com.tr/yamula-hidro-elektrik-santrali>, Accessed 3 April 2023.

- [33] DSİ, Akım gözlem yıllıkları. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/744>, Accessed 10 February 2023.
- [34] L. Breiman, Random forests. Machine Learning, 45 (1), 5-32, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- [35] L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. J. Stone, Classification and regression trees. Taylor and Francis, New York, 1984.
- [36] MGM, 2010 yılı iklim değerlendirmesi. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/2010-yili-iklim-degerlendirmesi.pdf>, Accessed 1 June 2023.
- [37] Enerji Atlası, Yamula Barajı ve HES yıllık elektrik üretimi. <https://www.enerjiatlası.com/hidroelektrik/yamula-barajı.html>, Accessed 3 April 2023.
- [38] EPIAŞ, 2020 yılı elektrik piyasası özet bilgiler raporu. https://www.epias.com.tr/wp-content/uploads/2021/01/EPIAS_2020_Yillik_Bulten_vson.pdf, Accessed 10 March 2023.





Sadeleştirilmiş kısıt-tampon-bağ (S-DBR) ve yalın-hat dengesi yöntemlerinin simülasyonla kıyaslanması

Benchmarking of S-DBR and lean-line balancing methods by simulation

Batuhan Kocaoğlu¹ , Utkan Uluçay^{2,*} 

¹ Piri Reis Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 34940, İstanbul Türkiye

² Maltepe Üniversitesi, Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi Bölümü, 34857, İstanbul, Türkiye

Öz

Geleneksel yaklaşımda işlem süreleri sabitken Yalın-hat dengesiyle gelir artışı sağlanacağı çok kaynakta kabul görmektedir. Bu çalışmanın amacı, işlem süresi değişken olduğunda S-DBR (Simplified Drum Buffer Rope: Sadeleştirilmiş Kısıt Tampon Bağ) yaklaşımının daha iyi sonuç vereceğini göstermektir. Bu amaçla Yalın-hat dengesi ve S-DBR temel kurguları simülasyonla modellenerek işlem sürelerinin değişken olduğu senaryoda kıyaslanmış ve istatistik değerlendirmesi yapılmıştır. İşlem sürelerinde değişiklik varken Yalın-hat dengesinde gününde teslim oranı %100' den %82' ye düşmüştür. S-DBR yöntemiyle değişkenliğe rağmen %84 gününde teslim oranıyla net gelirden %4, üretimde %3 artış elde edilmiştir. Dolayısıyla sadece üretim planlama ve yönetim metodunun değiştirilmesiyle, ilave yatırım gerektirmeden iş ortamındaki değişkenliğe daha dayanıklı ve daha rekabetçi olmak mümkündür. Çalışmanın özgünlüğü, üretim firmaları için Kısıtlar Teorisindeki uygun üretim çözümünün seçimi, S-DBR yönteminin uygulama ve iyileştirme algoritmalarının literatür senteziyle oluşturulması, istatistiksel uygulanabilirlik değerlendirmesi ve gelecek araştırmalar için içgörü oluşturmasıdır.

Anahtar kelimeler: Kısıtlar teorisi, S-DBR, Yalın, hat dengesi, simülasyon

1 Giriş

İkinci Dünya Savaşı'ndan bugüne gelirken arz artık talebi aşmış ve paradigma değişmiştir [1]. Ayrıca serbest ticaret dönemine giriş, internet çağının başlaması ve tedarik zincirlerinin gelişimi gibi sebepler aynı müşterilere ulaşmak isteyen üreticiler arasında rekabetin artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla siparişleri gününde teslim edebilecek (DDP: Due Date Performance: Gününde Teslim%) şekilde sistemlerin iyileştirilmesi önemli bir rekabet avantajı haline gelmiştir.

İyileştirilmeler maliyet tasarrufuyla başlamış, MRP I (Material Requirements Planning: Malzeme İhtiyaç Planlaması), MRP II (Manufacturing Resource Planning: Üretim Kaynak Planlaması), ERP (Enterprise Resource Planning: Kurumsal Kaynak Planlaması), TQM (Total Quality Management: Toplam Kalite Yönetimi), Yalın, 6

Abstract

It is common in the literature that a lean-line balance with fixed process times is a good way to achieve higher throughput. This study aims to demonstrate that S-DBR (Simplified Drum Buffer Rope) approach would produce higher returns when process times are not fixed. Lean-line balancing and S-DBR methods were modeled in a basic structure and benchmarked by simulation. Results were statistically assessed. The on-time delivery rate of the Lean-line balancing method decreased from 100% to 82% with varying process times. Meanwhile, the S-DBR method yielded 84% on-time delivery, resulting in increased net income by 4%, and shipments by 3%. It is possible to become more resilient and more competitive to the variability in the business environment without requiring additional investment by simply changing the production planning and management method. This study sets a guide for choosing the proper TOC (Theory Of Constraints) method for a certain business environment as well as disposing S-DBR algorithm synthesized by literature and statistically tested for adaptability. Additionally, an insight for future research is also presented.

Keywords: TOC, S-DBR, Lean, Line balancing, simulation

sigma, TOC (Theory of Constraints: Kısıtlar Teorisi) ile devam etmiştir [2].

MRP ile beklenen gününde teslim başarısı sağlanamamış, stoklar ve maliyetler yeterince düşürülemez. Aynı dönemde Japon firmaları Yalın felsefedeki manuel kanban kartlarıyla çok daha iyi sonuçlara ulaşmışlardır [2].

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) ABC televizyon kanalında yayınlanan Deming' in "Japonlar Nasıl Başardı?" programıyla birlikte ABD' de TQM yıldızı parlamıştır. Ancak yıllar sonra önemli bir muhasebe firmasının ABD' de yaptığı araştırmada TQM uygulayıcılarının sadece %5' inde olumlu sonuç görüldüğü belirlenmiştir [2]. Ayrıca iş dünyasındaki çekinceler Deming ve Malcolm Bridge Kalite Ödülü alan firmalardan bir kısmının iflas etmesiyle artmıştır [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: utkan.ulucay@gmail.com (U. Uluçay)

Geliş / Received: 16.06.2023 Kabul / Accepted: 17.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1315857

Ohno' nun ABD gezisinde ziyaret ettiği Ford otomobil fabrikası ve Wallmart süpermarketten esinlenen Yalın felsefede amaç israfları önleyerek akışı sağlamaktır [3]. Talebin temposu takt zamanıdır [4] ve hatlar takt zamanına göre dengelenerek kapasite israfı veya hızlı üretimle oluşacak stok israfı önlenmelidir [5].

Kısıtlar Teorisinin en öz ifadesi odaklanma (focus) ve kaldıraçtır (leverage) [6]. Goldratt odaklanma konusunu Pareto Prensipleriyle ilişkilendirerek birbirine bağımlılık (interdependency) olan süreçlerde prensibin 80-20 yerine 99-1 olduğunu iddia etmektedir [7]. Kısıtlar Teorisinin üretim çözümünde kaynak çakışmasını dikkate alan [4] proje yönetimi için CCPM (Critical Chain Project Management: Kritik Zincir Proje Yönetimi); kısıtın pazarda olduğu yani üretim kapasitesinin talepten fazla olduğu üretim hatlarında S-DBR (Simplified Drum Buffer Rope: Sadeleştirilmiş Kısıt Tampon Bağ); kısıtın üretimde olduğu yani üretim kapasitesinin talepten az olduğu [4] üretim hatlarında DBR (Drum Buffer Rope: Kısıt Tampon Bağ) yer almaktadır.

Yalın ve Ford tipi üretim yöntemlerini TOC ile karşılaştıran Goldratt, akışı önceleyen, belirli şartlarda üretimi durduran ve lokal verimden uzaklaşan ortak bir anlayıştan söz etmektedir. Ford ve Yalın yöntemleri stabil ortamlarda iyi sonuç verirken, değişkenliğin artmasıyla beraber TOC yöntemleri öne çıkmaktadır. Japon şirketlerinin %20' den azı Yalın uygulayıcısıdır [8].

American Production and Inventory Control Society (APICS) tarafından hazırlanan sözlükte değişkenlik kanunu (law of variability) "değişkenlik artarken sürecin verimi düşer" ve hat dengelemesi "hedeflenen üretim için iş istasyonu sayısını ve boş zamanları minimize eden yalın kavram" şeklinde tanımlanmıştır [4]. 24.APICS Konferansında Goldratt kesin sürelerle dengelenmiş bir üretim hattını incelemiştir. İşlem sürelerindeki değişkenlik ve işlemler arasındaki bağımlılık nedeniyle planlanan performans elde edilememiştir [9].

Dolayısıyla işlem sürelerinde değişkenlik olan üretim hatlarında gününde teslim performansını iyileştirecek bir yönetime ihtiyaç görülmektedir. Araştırma sorusu "İşlem sürelerinde değişkenlik varken S-DBR ile Yalın-hat dengelemesinden daha yüksek performans sağlanabilir mi?" şeklinde seçilmiştir.

Bu çalışmada S-DBR yönteminin uygulanabilirliği sorgulanarak, algoritması açığa çıkarılmıştır. Bu algoritmayla uygun yazılım eklentilerinin hazırlanabilmesi ve gelecek akademik araştırmalara yön verilmesi mümkün olabilecektir.

Makalenin ikinci bölümünde tanımlar listelenmiş, hat dengelemesi çalışmaları problem tipleri ve çözüm yöntemleri açısından kısaca derlenmiştir. Üçüncü bölümde literatür sentezlenerek S-DBR algoritması çıkarılmış, yalın-hat dengelemesi ve S-DBR yöntemlerinin işlem sürelerinde değişkenlik varken kıyaslanabilmesi için kullanılan simülasyon modeli, göstergeler ve senaryolar tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde kıyaslama bulguları ve istatistik testler, beşinci bölümde bulguların değerlendirilmesi, altıncı bölümde sonuç ve öneriler yer almaktadır.

2 Literatür araştırması

2.1 Tanımlar

Yalın ve TOC DBR, S-DBR konularıyla ilgili terimlerin tanımları aşağıda listelenmiştir:

- Süpermarket (supermarket): Yalında farklı rotaların kesişim noktalarında çeşitli parçalar için tutulan ve kanban kartlarıyla önceden belirlenmiş stoktur [10].

- Ürün ailesi (product family): Benzer nitelikleri olan ürünlerdir, benzerlik ölçüsü benzer makineler ve operatör süresinde azami %30 fark kadardır [5].

- Kapasite (capacity): Bir üretim kaynağının üretim işlemleri için erişilebilen toplam süresidir, aşağıdaki üç bileşenin toplamıdır [11].

- Üretim (process) süresi: Üretimde doğrudan malzemenin çalışıldığı süredir.

- Tip değişimi (setup) süresi: Ürünler arasında hazırlık için gereken süredir.

- Koruyucu (protective) kapasite-Atıl (idle) süre: Üretim ve tip değişimi dışında kalan arıza, onarım, planlı bakım, boş bekleme vb diğer sürelerin tamamıdır [11].

- Kapasite kullanımı (load): İş istasyonunun işgünü içinde planlı saatlerdeki çalışma süresinin planlanan azami çalışma süresine oranıdır, % cinsindedir, olası kısıtı belirlemek için izlenir [12].

- Darboğaz (bottleneck): Günde 24 saat çalıştığında dahi talebe yetişemeyen kaynaktır [13].

- Kısıt (drum, CCR:Capacity Constrained Resource): TOC içinde koruyucu kapasitesi, tam kapasitesinin %30' undan az olan kaynaklardır [11].

- Kısıt olmayan (non-constrained): TOC içinde koruyucu kapasitesi, tam kapasitesinin %30'undan fazla olan kaynaklardır [11].

- Tampon (buffer): Belirsizliği sönmölemek üzere alınan önlemlerin ortak adıdır, üç tiptedir.

- Stok (inventory): Hammadde, yarı mamul veya mamul stok tutulmasıdır, adet bazındadır.

- Kapasite (capacity): Süreç boyunca iş istasyonlarda tutulan kapasite fazlasıdır, % bazında ifade edilir.

- Zaman (time): Sürece erken başlayarak alınan önlemdir. DBR ve S-DBR yöntemlerinde her sipariş için termine göre iş emri verilebilecek en erken zamanlamayı belirler, süre cinsindedir [4].

- Tampon bölgesi (buffer zones): Penetrasyona göre belirlenen, üç eşit büyüklükte bölgedir; kırmızı – sarı – yeşil olarak adlandırılır, siparişlerin önceliklerini gösterir [14].

- Penetrasyon (buffer penetration): Siparişin terminine kalan sürenin, tampona oranıdır, % cinsindedir [14].

- Tampon yönetimi (buffer management): TOC içinde kısıtı boş bırakmamak ve termini kaçırmamak için siparişlerin zaman bazında bölgelere ayrılarak yönetilmesidir [4].

- Bağ (rope): TOC içinde kısıtla işletmeye malzeme veya iş emri girişi arasında kurulan bilgi akışıdır [4].

- Planlanan iş yükü (planned load): TOC içinde kesinleşen siparişlerin kısıtta gerek duyduğu toplam standart süredir [4].

- İşlem süresi (process time): Tek bir ürünün hiçbir bekleme olmadan sadece işlem gördüğü süredir [14].

• Akış süresi (lead/flow time): Tek bir ürünün, tipik bir iş gününde, müdahale edilmeden, üretime çıkışından sevk edilene kadar geçen süredir [14].

• Alışılmış termin (standard/quoted lead time): Firmanın sektöründe piyasada kabul gören standart termin süresidir [12].

• Güvenli termin (safe due date): Planlanan iş yüküne algoritmada gösterilen emniyet payı eklenerek belirlenen termin tarihidir [12].

• Hızlı termin (rapid response): Müşterilerden daha yüksek fiyat isteyebilmek için piyasada geçerli standart terminden daha hızlı teslimi sağlayacak termindir [12].

• Ortalama sipariş (average sized order): Geriye dönük ve tercihen son bir yıllık dönemde gerçekleşen ortalama sipariş büyüklüğüdür [12].

• Büyük sipariş (large order): Ortalama sipariş büyüklüğünün 4 katıdır [12].

• Uzun süreli operasyon (long processing time): Belirlenen tamponun 1/3' ü veya daha uzun süreli veya işletme dışında yapılan operasyonlardır [12].

• Tam takım (Full kitting): Üretimde gerekecek her türlü malzeme, onay, parça, vb tam olmalıdır [12].

2.2 Hat dengelemesinin gelişimi

Montaj hatları çevrim süresi ve istasyon sayısına göre incelendiğinde 4 tipte sınıflanmaktadır:

- Tip I, sabit çevrim süresi-minimum istasyon sayısı;
- Tip II, min çevrim süresi-sabit istasyon sayısı;
- Tip E, minimum çevrim süresi-minimum istasyon sayısı ve
- Tip F, mümkün olan en küçük çevrim süresi-mümkün olan en küçük istasyon sayısı [15].

Montaj hattı dengelemesinde itme esaslı çözümler analitik ve sezgisel olarak iki grupta sınıflanmaktadır. Analitik çalışmalarda üç ayrı sınıflandırma görülmüştür:

• Tip E: Çevrim süresi ve istasyon sayısı azaltılarak hat verimini yükseltmek amaçlanmaktadır. Çevrim süresi ve istasyon sayısının belirsiz olduğu ortamda karışık tam sayılı programlama yöntemi kullanılmıştır [16].

• Tip II: Çevrim süresini azaltmak amaçlanmaktadır. Deterministik ortamda tam sayılı programlama [17], çevrim zamanı belirsiz alınarak sezgisel algoritmayla desteklenen karışık tam sayılı programlama [18] çalışmaları incelenmiştir.

• Tip I: İstasyon sayısını azaltmak amaçlanmaktadır. Deterministik ortamda tam sayılı programlama [19], ergonomik faktörleri dikkate alan hedef programlama [20], çevrim zamanı – istasyon sayısı – iş yükü belirsiz alınarak U tipi bantta bulanık tam sayılı programlama [21] ve karma tam sayılı programlamayla başlanan ancak problem ölçeği artınca sezgisel yönetime geçilen [22] çalışmalar görülmüştür.

Sezgisel çalışmalarda üç ayrı sınıflandırma görülmüştür:

• Tip E: Bir vaka çalışmasında deterministik ortamda sıralı konum ağırlığı yöntemi [23], yine deterministik ortamda simülasyonla karşılaştırmalı yapılan sıralı konum ağırlığı yöntemi [24] kullanılmıştır.

• Tip II: Hazır giyimde ve deterministik ortamda yapılan bir çalışmada konum ağırlığı – Hoffman – Kilbridge – basit sezgisel yöntemler karşılaştırmalı denenerек sektöre basit sezgisel yöntemin uygunluğu değerlendirilmiştir [25]. Bir diğer çalışmada basit montaj hattı ve deterministik ortamda karınca kolonisi – konum ağırlıklı yöntemler karşılaştırmalı kullanılmıştır [26].

• Tip I: Kaynak kısıtı olan deterministik ortamda konum ağırlıklı yöntem [27], işlenmiş gıda endüstrisinde deterministik ortamda sıralı konum ağırlıklı yöntem [28], metal endüstrisinde deterministik ortamda sıralı konum ağırlıklı yöntem [29], otomotiv endüstrisinde deterministik ve stokastik ortamla karşılaştırma çalışmasında COMSOAL (Computer Method of Sequencing for Assembly Lines: Montaj Hatları İçin Bilgisayarlı Sıralama Yöntemi) [30] ve büyük ölçekli problemlerde karmaşık tam sayılı programlama yerine COMSOAL – tavlama benzetimi yöntemleri [22] kullanılmıştır.

Bu çalışmada literatürde daha az karşılaşılan stokastik (belirsiz, değişkenlik içeren) çevrim süresi ve literatürdeki itme kurgusuyla, yalın kültürdeki çekme kurgusu karşılaştırması yapılacaktır. Çalışmadaki montaj hattının literatüre uygun sınıflaması Tip F' dir. İş istasyonu sayısı aynıken çevrim süresini talebe uygun hale getirmeyi hedeflemektedir. Yalın yaklaşımda talepten fazla üretim "aşırı üretim" olarak önemli bir israf unsuru kabul edilir. Bu çalışmanın S-DBR yöntemi uygulamasında ana motivasyon verim yerine gününde teslim etmektir.

Montaj hatlarını çalışılan parçaların senkronize ilerleyişine göre değerlendirerek senkron, asenkron ve hibrit sınıflaması yapılmıştır. Montaj hattı dengelemede belirsizlik nedeniyle istasyonlar arasında tampon stoklar oluşturulması önerilmiştir [31]. Bu çalışmadaki montaj hattı Hibrit sınıflamasındadır, değişken operasyon sürelerine ve istasyonlar arasında tampon stok uygulamasına yer verilmiştir.

Yüksek değişkenlik içeren siparişe üretim (MTO: Make-to-order) ortamında siparişlerin planlanması (ORR: Order Review/Release: Siparişlerin Ön İnceleme ve İş Emri Verilişi) ve iş yükü kontrolü (WLC: Work Load Control) farklı üretim yönetimi uygulamalarının ortak paydası olabilecektir. Araştırmacılar stok – kapasite – zaman tamponları kavramlarını Kısıtlar Teorisi isimlendirmesi olmadan vurgulamışlardır. Belirsizlik nedeniyle uygun analitik yöntemin simülasyon olduğu belirtilmiştir [32]. Bu çalışmanın S-DBR uygulamasında zaman tamponu simülasyon yöntemiyle denenmiştir.

Üretime geri dönüşleri içeren üretim ortamında kalite – operasyon süresi – arıza – onarım süresi gibi çeşitli belirsizlikler söz konusudur. Belirsizlikleri kapsayacak en uygun analitik yöntem simülasyondur. DBR yöntemi esas alınmakla beraber araştırmacılar bütüncül sistem yaklaşımı yerine indirgemeci lokal yaklaşımı iteratif olarak kullanmayı tercih etmişlerdir [33]. Bu çalışmada S-DBR yöntemi sistemin tamamını içerecek şekilde ancak tampon yönetimi olmaksızın örneklenmiştir.

2.3 S-DBR yönteminin gelişimi

İşletmelerde belirsizlik sorunu; stok yaparak, erken başlayarak veya kapasite fazlasıyla çözümlenmektedir. Bu yöntemlerin bütüncül değerlendirilerek optimize edilmesi gerekmektedir. Örneğin kapasite fazlası varken tutulan stok miktarı azaltılabilmektedir. Dolayısıyla her kurum kendi iş ortamına göre önceliklerini belirlemelidir [34].

Yalın yaklaşımında tek parça akış hedefi vardır, süpermarketler aracılığıyla montaj hattında ayrışma noktaları oluşturulur. TOC yaklaşımında kısıtı koruyacak kadar ve koruyacak yerde olmak üzere stoklar belirlenir, dolayısıyla stok toleransı daha yüksektir [8].

Yalın yaklaşımında üretime erken başlama durumu yoktur, stabil pazarda uygundur. Yalın yaklaşımında üretim hareketlerini kanban kartları tetiklemekte ancak talep dalgalanması halinde üretimde geçici boşluk ve yığılmalar görülebilmektedir. TOC yaklaşımında bağ kullanımıyla erken başlama halleri zorlaştırılmıştır ve planlanan iş yükü ile geleceğe dair bir önlem fırsatı sağlanmıştır [14].

Yalın yaklaşımında kapasiteler dengelendiği için takt zamanına göre küçük miktarda bir pay ayırdıktan sonraki kapasite fazlası israf olarak değerlendirilmektedir. TOC yaklaşımında kapasite; üretim, tip değişimleri, koruyucu kapasite olarak sınıflandırılmakta ve koruyucu vasfını yitirmeden iyileştirilmesi önerilmektedir [14]. Temel karşılaştırma özeti **Tablo 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. Yalın ve Kısıtlar Teorisi temel karşılaştırma tablosu

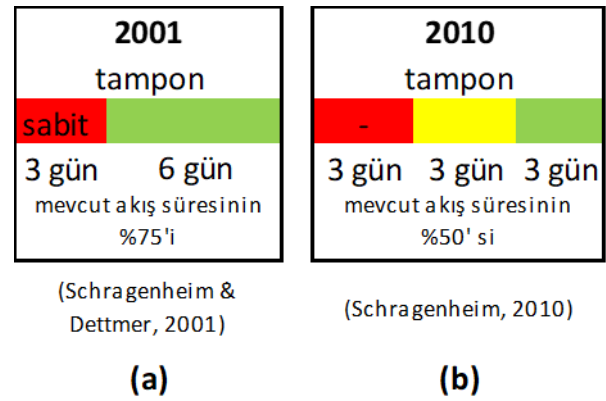
Konu	Yalın	Kısıtlar Teorisi	Kaynak
Kapasite yaklaşımı	Dengeli hat	Dengesiz hat, kısıt (Drum)	[35]
Tempo yaklaşımı	Takt zamanı	İş varsa koş, iş yoksa dur (Road Runner work ethic)	[35]
İş emri yaklaşımı	Kanban	Bağ (Rope)	[35]
Tamamlama yaklaşımı	Stok (supermarket)	Zaman (Buffer)	[35]
Sürekli İyileştirme yaklaşımı	Her yerde, Kaizen	Geciken işlere göre (POOGI: Process of Ongoing Improvement-Sürekli iyileştirme)	[36,37]
Amaç yaklaşımı	İsrafi önle, çevrim zamanını düşür	Geliri artır	[35]
Durum analizi yaklaşımı	Süreç bazlı	Sebe-sonuç bazlı	[5,38]

TOC yaklaşımında üretim çözümü DBR, S-DBR ve CCPM yöntemleri ve bunlarla birlikte kullanılan dinamik önceliklendirme için BM (Buffer Management: Tampon Yönetimi), işletme seviyesinde kullanılabilen kısıta uygun finansal değerlendirme için TA (Througput Accounting: Katkı Muhasebesi) ve sebep-sonuç temelli olarak çatışmaları belirleyerek çözümlenmek için TP (Thinking Process: Düşünme Süreçleri) yöntemlerinden oluşmaktadır [14].

DBR yöntemi önce Optimized Production Technology (OPT) yazılımıyla ortaya çıkmış, daha sonra Goldratt'ın The Goal [37] kitabıyla popüler olmuş ve ilk defa The Race [39] kitabında yazılı kural seti olarak açıklanmıştır. Kuram; paradigma değişimi gerektirdiği, uygulamada tereddüt edildiği ve mevcut iyi uygulamalar olan S &OP (Sales and Operations Planning: Satış & Operasyon Planlama) kapsamındaki MPS (Master Production Schedule: Ana Üretim Çizelgesi), MRP (Manufacturing Resources Planning: Üretim Kaynak Planlama) ve RCCP (Rough Cut Capacity Planning: Kaba Kapasite Planlaması) ile uyumlandırılmadığı için beklenen kabulü görmemiştir [14].

Bu sıkıntıları giderebilmek ve uygulama kolaylığı sağlarken kuramın gücünü tam olarak kullanabilmek amacıyla S-DBR geliştirilmiş ve ilk defa Manufacturing Warp Speed [14] kitabıyla açıklanmıştır. Bu versiyon değişen paradigmaya uygun olarak kısıtın üretimde değil pazarda olduğu varsayımına dayanmaktadır. Planlanan İş Yükü yaklaşımı S & OP işleyişiyle uyumludur, tahminleri ipucu olarak değerlendirmekte, gerçekleşen siparişleri RCCP işleyişindeki gibi istasyonların kapasite kullanım oranlarını izleyerek yerleştirmektedir. MRP işleyişine uygun olarak üretim istasyonları için kapasite tamponu, siparişler için zaman tamponu ve malzemeler için stok tamponu tercih edilmektedir [14].

S-DBR uygulaması 2001 yılında **Şekil 1 (a)**'da gösterildiği gibi eşit büyüklükte olması gerekmeyen yeşil ve kırmızı olarak iki bölgeli, tampon büyüklüğünden bağımsız sabit kırmızı bölgeli tamponla kurgulanmıştır. Tampon büyüklüğü piyasada alışılmış teriminle ve olası üretim içi kısıtın akıştaki yeriyle ilişkilendirilmemiştir. Tamponun başlangıç için mevcut kapıdan kapıya akış süresinin %75' iyle başlanarak kademeli düşürülmesi öngörülmüştür. Planlanan iş yükü sadece olası iç kısıtın yerini belirlemek içindir [14].



Şekil 1. (a) 2001 tampon yapısı (b) 2010 tampon yapısı

Schragenheim 2001 yılında hazırladıkları kavramı, 2010 yılında TOC Handbook 9. Bölüm içinde değiştirmiştir: **Şekil 1 (b)**'de gösterildiği gibi tampon kırmızı – sarı – yeşil olarak 3 eşit bölgeli geleneksel DBR tamponu olarak değiştirilmiştir. Kırmızı bölge ortalama büyüklükteki bir siparişi boş işletmede bitirecek kadar büyük planlanmıştır. Tamponun tamamı piyasada alışılmış teriminin veya akış süresinin yarısı kadar kurgulanmıştır. Planlanan iş yükü hem

olası iç kısıtın yerini belirlemek hem de güvenli termin vermek için kullanılmıştır. Hızlı terminleri daha yüksek fiyatla satma opsiyonu ve buna bağlı kapasite rezervasyonu düşünülmüştür [12].

Karşılaştırmalı özeti Tablo 2’de verilen literatürde S-DBR uygulaması için ortak bir uygulama yöntemi yoktur. Ticari yazılımların izlediği algoritmalar gizli tutuldukları için kavrama uygunluğunu belirlemek kolay değildir. Dolayısıyla bu çalışmada literatürdeki bu boşluk literatürün senteziyle S-DBR algoritması verilerek ve simülasyonla doğrulama yapılarak kapatılmak istenmiştir.

Tablo 2. Literatür değerlendirmesi

Yazarlar / Eser	Yayın Tarihi	Yayın	Yalın	S&OP	DBR	S-DBR	Sektör
Goldratt / The Unbalanced Plant	1981	Makale	X	-	X	-	İmalat
Goldratt & Cox / Amaç	1984	Kitap	X	-	X	-	İmalat
Goldratt & Fox / The Race	1986	Kitap	X	-	X	-	İmalat
Smith The Measurement Nightmare	2000	Kitap	-	-	X	-	-
Rother & Harris Sürekli Akış Yaratmak	2001	Kitap	X	-	-	-	-
Schrageheim & Dettmer / Manufacturing at Warp Speed	2001	Kitap	X	X	X	X	İmalat
Bicheno The New Lean Toolbox	2004	Kitap	X	-	X	-	-
Goldratt / Standing on the Shoulders of Giants	2009	Makale	X	X	X	-	İmalat
Cohen / Ever Improve	2010	Kitap	-	X	X	X	İmalat
Schrageheim / From DBR to S-DBR for MTO	2010	Kitap bölüm	-	X	X	X	İmalat
Blackstone / Review of literature	2010	Kitap bölüm	-	X	X	X	-
Pirasteh & Fox Profitability With No Boundaries	2011	Kitap	X	-	X	X	İmalat
Gökçen, Boru, Dosdoğru / ..tedarikçi seçimi..	2018	Makale	-	-	-	-	İmalat
Bu çalışma	2023	-	X	X	-	X	İmalat

DBR eleştirileri arasında yer değiştiren kısıtları dikkate almaması, kısıtın boş kalmamasına özen gösterirken bloke olmasını ihmal etmesi, tedarik zinciri işleyişinde sadece kısıttan önceki süreci izlemesi nedeniyle bazı hallerde kısıttan sonra yeterli stok olmasına rağmen aşırı üretimi tetiklemesi, çizelgelemesinin zayıflığı nedeniyle net öncelikleri göstermemesi sayılabilir [40].

3 Yöntem

Algoritma üç aşamalıdır. Birinci aşamada iş ortamı şartlarına uygun TOC çözümüne yönlendirme yapılmıştır. İkinci aşamada tamponun belirlenmesini, planlamayı, güvenli termin verilmesini, etkileşimli iç kısıtın takibini içeren uygulama gösterilmiştir. Üçüncü aşamada dinamik tampon yönetimi ve odaklanmış iyileştirme işleyişi açıklanmıştır.

3.1 S-DBR algoritması – birinci aşama

Her sektörde işlem süresi değişkenliği veya ürünün işlenme-bekleme süre dağılımı aynı değildir. S-DBR yönteminin uygulanabilirlik varsayımları arasında üretim takibinin adet birimiyle yapılabilmesi, ürün aileleri bazında ana hatların belirli olması, bazı noktalarda farklı yönde hareket edilse dahi genel olarak akışın belirli bir yönde olması, çok uzun süreli operasyonların net belirlenebilmesi, üretimdeki iş istasyonlarının kapasitelerinin pazar talebinden fazla olması sayılabilir [11,14].

Birinci aşamanın algoritması Şekil 2’de gösterilmiştir.

• 1: Başlarken ürün aileleri ve aile bazında ana hatlar belirlenir, akış yönü netleştirilir, iş istasyonlarının kapasite kullanımı (iş yükü) izlenir.

• 2: İşletmedeki akış süresinin içinde beklemelerin payı sorgulanmaktadır. Buradaki %10 eşik değeri için Blackstone %5 [13], Schrageheim %10 [12], Cohen %10 [11] önermiştir.

• 3: İşlem süresi, akış süresinin %10’ undan fazlaysa iş ortamı rutin üretimden ziyade proje üretimine benzemektedir, dolayısıyla TOC CCPM uygulaması önerilmiştir [14].

• 4: Uzun süreli operasyonlar (fırınlama, fason işlem gibi) belirsizlik veya değişkenliğin etkisinin belirginleştiği alanlardır ve değişkenliğin olumsuz etkilerinin sınırlanabilmesi için tipik ayrışma noktalarıdır.

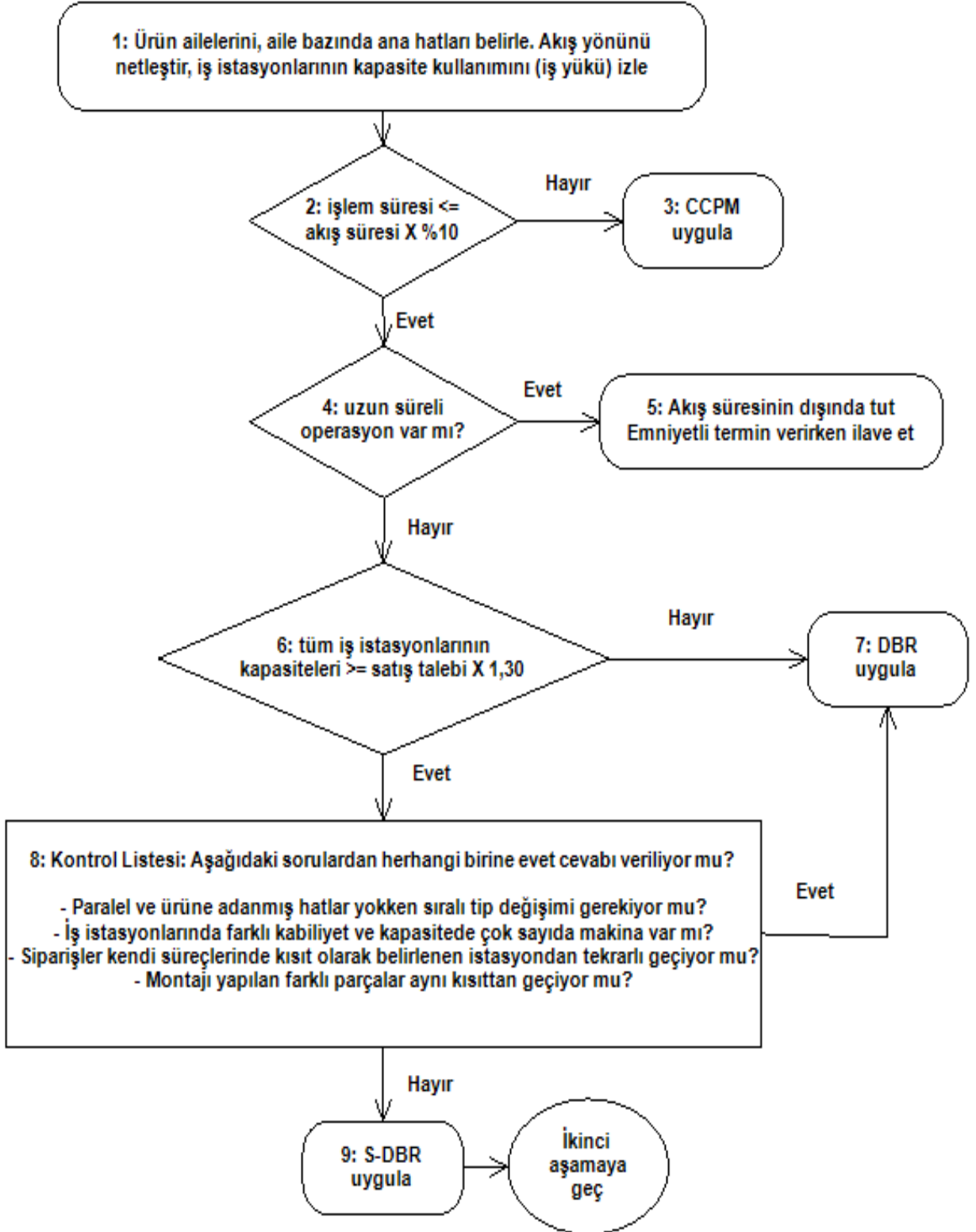
• 5: Uzun süreli operasyonların işlem süresi akış süresinden ayrı değerlendirilir, termin verilirken akış süresine eklenir.

• 6: İş istasyonlarının iş yükleri zaman cinsinden izlenmelidir, belirsizliğe dayanım için kapasite tamponu tercih edilir. %30 kapasite fazlası eşiği önerilmiştir [11,14].

• 7: Herhangi bir istasyonda hedeflenen talebe göre %30 koruyucu kapasite sağlanamıyorsa kısıt pazarda değil, üretimde ortaya çıkabilecektir, DBR uygulaması önerilmiştir.

• 8: Paralel ve ürüne adanmış hatlar yokken sıralı tip değişimi gerekiyorsa, iş istasyonlarında farklı kabiliyet ve kapasitede çok sayıda makina varsa, siparişler kendi süreçlerinde kısıt olarak belirlenen istasyondan tekrarlı geçiyorsa, montajı yapılan farklı parçalar aynı kısıttan geçiyorsa S-DBR yerine DBR kullanımı önerilmektedir [14].

• 9: S-DBR uygulanabilir.



Şekil 2. S-DBR birinci aşama algoritması

3.2 S-DBR algoritması – ikinci aşama

Rekabet avantajı aynı sektördeki rakiplerin alışılmış termin süresinden hızlı servis vermekle kazanılacaktır. Kimi zaman yeni ürün grupları için işletme içindeki fiili akış süresi önceden bilinmemektedir. Bu gibi hallerde alışılmış termin süresi kullanılabilir [11].

İşletmeye tüm siparişler termin ve tampona göre belirlenenden erken çıktığında iş istasyonları arasında işletme içi stoklar oluşacak, öncelikler karışacak, bozulma – kayıp gibi sorunlar görülebilecek, siparişler gecikebilecektir. Siparişler üretime geç çıktığında kısıt iş istasyonu boş kalabilecektir. Acil siparişlerin sıradaki iş istasyonunda bekletilmeden çalışması istenebilecektir [14].

Dolayısıyla işletmenin mevcut durumu rekabet avantajı açısından önemlidir, başlangıçta ve her yeni sipariş geldiğinde, her sipariş sevk edildiğinde izlenmelidir. S-DBR İkinci aşama algoritması Şekil 3'te gösterilmiştir.

• 10: S-DBR uygulamasına başlarken MRP, MPS, iş istasyonu iş yükü izlemesi, sipariş çizelgesi, ürün aileleri, üretim hattı yapısı, üretim ve Planlama personeliyle iletişim konuları önemlidir.

• 11: MRP yazılımı varsa kapasite kullanımları her iş istasyonu için izlenebilecektir. Uygun bir yazılım yoksa pasif kısıt olarak belirlenen iş istasyonunun izlenmesi yeterlidir.

• 12: Ortalama büyüklükte bir sipariş kırmızı tampon kodu olarak acil olduğunda bir tampon bölgesi içinde bitirilebilmelidir, planlanan akış süresi üç eşit bölgeye ayrıldığı için 3 kat şartı aranmaktadır. Diğer yandan pazardaki rakiplerin verdiği terminden daha uzun termin verilirse rekabet edilemez. Ayrıca bu sürenin yarısıyla başlanarak işletme içinde akış hızlandırılmalıdır [11].

• 13: İşletmenin mevcut durumu sektörün alışılmış performansıyla kıyaslanmaktadır. Eğer işletme sektörün pratik performansını karşılayamıyorsa önerilen tedbirlere göre durumunu gözden geçirmelidir.

• 14: Tampon belirlenmektedir. Tampon adet cinsinden stok yerine süre cinsinden zaman birimlidir. Tampon aynı zamanda işletmeye iş emri girişi kapısını “bağlamaktadır”. İş istasyonları boş kalsa dahi tamponla belirlenen günden önce iş emri verilmemelidir. İş emri verirken diğer gösterge iş emrinin “Tam Takım” (Full Kitting) olmasıdır. “Tam Takım”; çizim, onay, malzeme, parça gibi işin yapılması esnasında gereken tüm bileşenlerin hazır olması anlamına gelmektedir. Ortalama sipariş bitim süresinin üç katı kuralı Cohen [11] ve Blackstone [13] ortak önerisidir. Alışılmış termin ve akış süresinin %50 kuralı için Schragenheim önce %75 [14] sonra %50 [12] önerirken, Cohen %50-%60 [11] ve Blackstone %50 [13] önermektedir. Ürün ailelerinin belirlenen tampon süreleri arasında %25'ten fazla fark oluşuyorsa aile bazında farklı tampon süresi kullanılmaktadır [12].

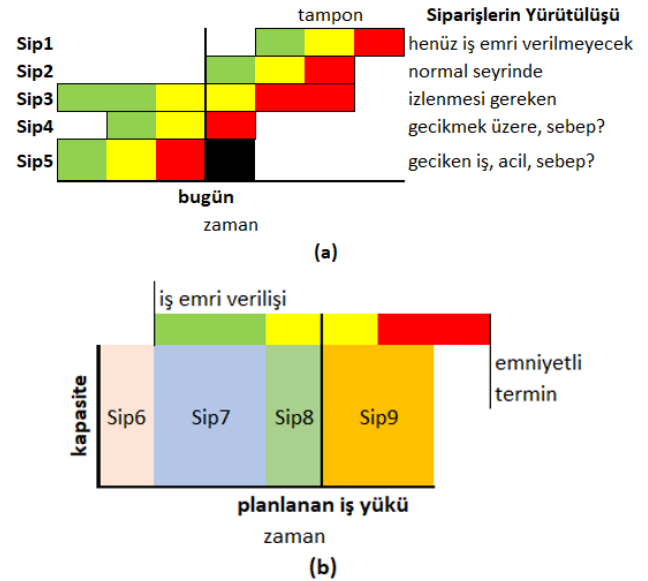
• 15: İşletme henüz sevk etmediği siparişlerin durumunu gözden geçirmelidir. Bu siparişlerin bir kısmı pasif kısıttan geçmiyor veya pasif kısıttaki işlemini tamamlamış olabilir. Başlangıç aşamasında zorunlu bir değerlendirmedir, devam eden günlerde her yeni sipariş ve sevk sisteme işleneceği için

bir daha bu çapta bir değerlendirme gerekmeyecektir. “Penetrasyon” Denklem (1)'de gösterildiği gibi % cinsinden hesaplanmakta ve negatifse mavi, %0-%33 arasındaysa yeşil, %34-%67 arasındaysa sarı, %68-%100 arasındaysa kırmızı, %100' den büyükse siyah renk kodu verilmektedir.

$$\text{Penetrasyon} = \frac{100 * (\text{Tampon süresi} - \text{Termine kalan gün})}{\text{Tampon süresi}} \quad (1)$$

Mavi renk kodu üretime verilmeyecek ve “Tam Takım” olması sağlanacak anlamındadır. Yeşil renk kodunda üretime iş emri verilir, öncelik düşüktür, özel takip veya müdahale gerekli değildir. Sarı renk kodu, yeşile göre daha önceliklidir, özel takip veya müdahale “genellikle” gerekli değildir. Öncelikler %penetrasyona göre değil, renk kodu bazında tayin edilmektedir. Kırmızı renk kodu siparişin gecikmek üzere olduğunu gösterir, bu koddaki tüm siparişler satış ve üretim ekipleri tarafından günlük takip edilmeli, hızlandırılmalıdır. Kırmızı koda giren her sipariş için akışın gecikme nedeni not edilmelidir, bu nedenler Pareto Şemasıyla incelenerek odaklı iyileştirmeye yol gösterecektir.

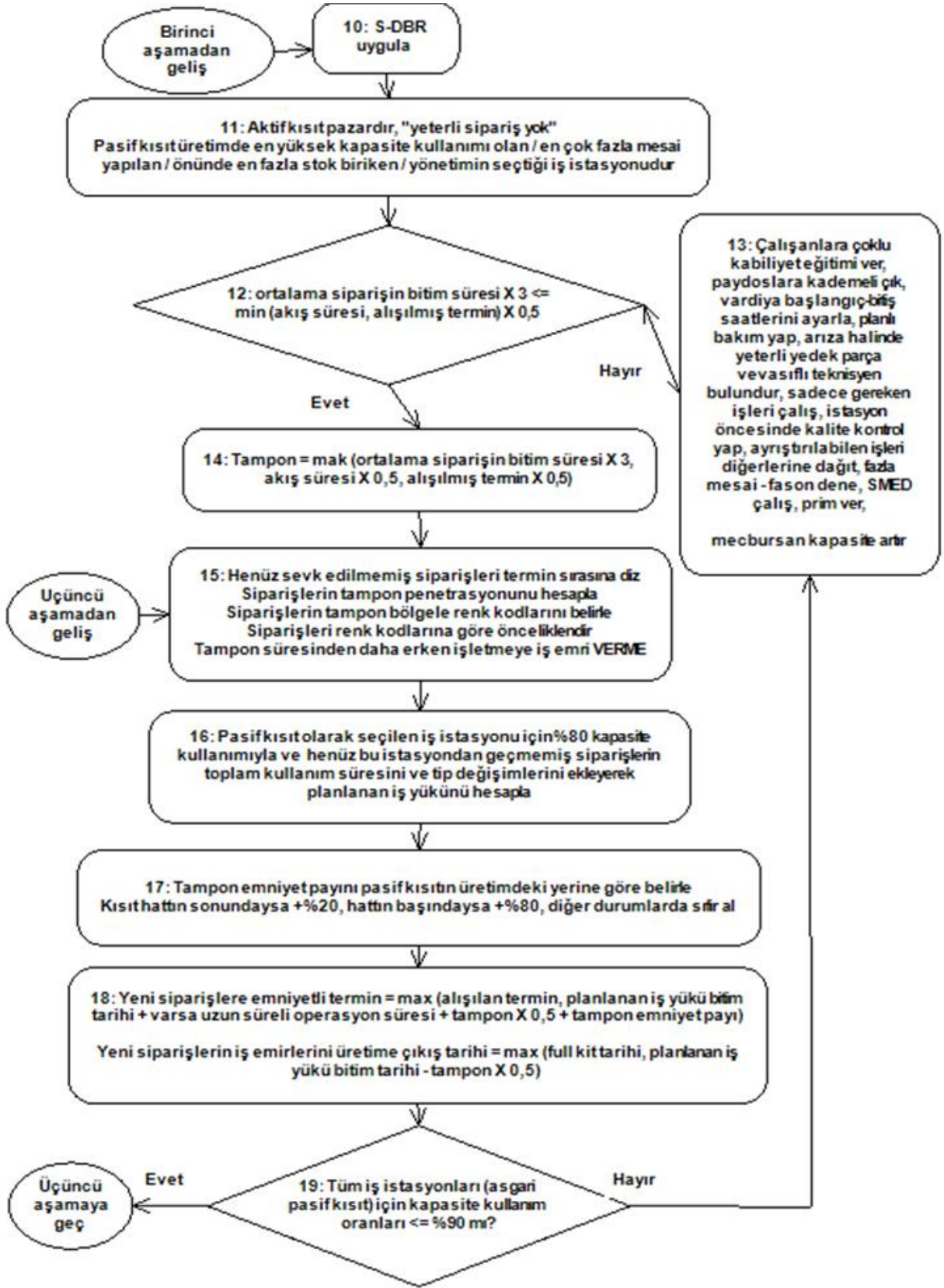
Termine göre geciken siparişler siyah renk koduyla gösterilir, hedefi sıfırdır, çok yakın takip edilmeli ve sonuçlandırılmalıdır. Şekil 4 (a)'da işleyiş örneğinden görülmüştür.



Şekil 4. (a) Dinamik tampon yönetimi (b) Planlanan iş yükü ve emniyetli termin verililişi

• 16: Planlanan iş yükü hesaplanmaktadır. İşletme içindeki pasif kısıta göre izleme yapılmakta ve %70 eşik değere rağmen %80 doluluk geçici olarak normal kabul edilmektedir. S&OP – MPS uyumlu geleceğe dönük kaba kapasite kontrolüdür. Şekil 4 (b)'de gösterilmiştir.

• 17: Güvenli termin verilirken pasif kısıtın üretim hattındaki yerine göre tampon süresi üzerinden emniyet payı düşünülür. Pasif kısıt hammadde girişine yakınken %80, sevkiyata yakınken %20 ilave edilmesi önerilmiştir [12].



Şekil 3. S-DBR İkinci aşama algoritması

• 18: Güvenli termin belirlenmektedir. Güvenli termin, piyasanın alıştığı terminden kısayken eğer karşılığında fazla fiyat talep edilemiyorsa ve rekabet açısından sorun yoksa alışılmış terminin verilmesi tercih edilmelidir. Güvenli termine 17. adımda belirlenen emniyet payı ve varsa uzun süreli operasyon farkı eklenmelidir. Yeni siparişlerin iş emirleri, işletme içinde âtil iş istasyonları olsa dahi, “Tam Takım” olmadan veya belirlenen çıkış tarihinden önce verilmemelidir [14].

• 19: Pasif kısıt oluşumu takip edilmektedir. İş yükü takibi için kullanılan %90 eşik seviyesinde Cohen, Blackstone ve Schragenheim mutabaktır [11,13,14].

3.3 S-DBR algoritması – üçüncü aşama

Yalın felsefesinde sürekli iyileştirme vardır ancak kısıt olmayan bir makinada yapılacak iyileştirmenin işletmenin performansına etkisi olmayacaktır. Hammaddede eksikleri nedeniyle gününde teslim edemeyen bir işletmede tedarikteki iyileştirme, kalite iyileştirmesine göre daha öncelikli olmalıdır [37]. S-DBR ile yapılan Pareto Analizi işletmenin en önemli gecikme sebebine odaklanarak en kısa zamanda fark edilir sonuç almaya yardımcı olacaktır [14]. S-DBR İyileştirme algoritması Şekil 5’te gösterilmiştir.

• 20: İşletmenin amacına ulaşmasına katkı sağlayan faaliyetler verimlidir [37]. Çok sayıda iyileştirme faaliyet seçeneği arasından gününde teslim azami katkısı olanlar seçilmelidir.

• 21: Siparişler sevk edilirken tampon bölgelerinin renk kodları kaydedilmelidir. Kırmızı ve siyah renk kodları için gecikmenin sebebi Pareto Şemasıyla izlenebilecek şekilde kodlanabilmelidir. İşletmeye nakit girişi, makinelerin verimli çalışmasıyla değil siparişlerin gününde sevk edilerek fatura kesilmesiyle gerçekleşmektedir [37].

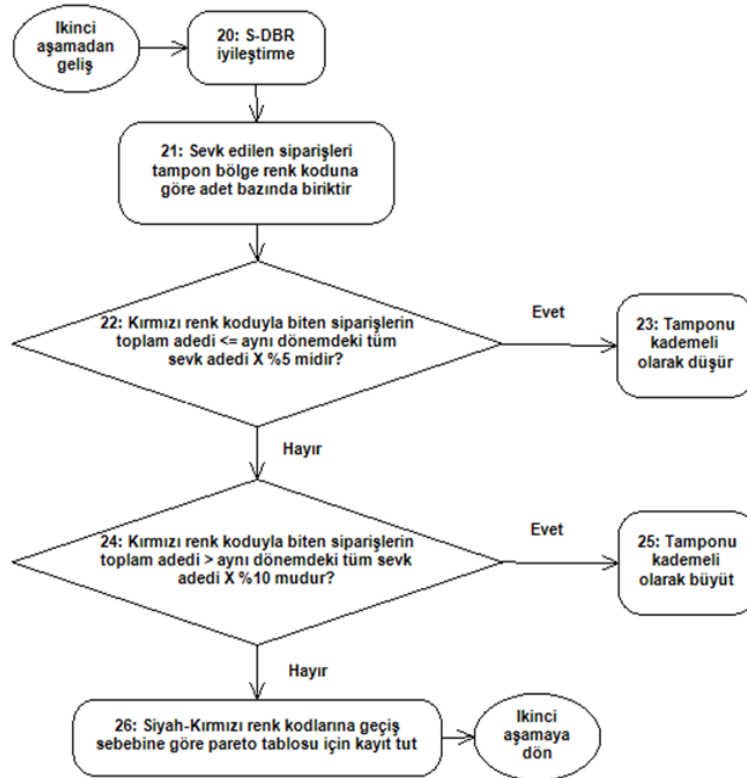
• 22: Siparişlerin büyük kısmı kırmızıya düşmeden bitiyorsa kullanılan tampon süresinin düşürülmesi mümkündür, rekabet avantajı yaratacaktır. Eşik değer Blackstone’ un önerdiği gibi %5 olarak alınmıştır [13].

• 23: TOC de stok tamponlarını 1/3 oranında kademelendirmek önerilmektedir. Ancak bu noktada her işletmenin kendi iş ortamına uygun bir yol izlemesi daha uygun olacaktır. Sistem dinamiktir, gerekirse tekrar ayarlanabilecektir.

• 24: Siparişler sık sık kırmızı-acil bölgesine düşüyorsa işletmenin gereksiz yere yorulması ve siparişlerin gecikme riski söz konusu olmaktadır. Eşik değer olarak Blackstone’ nun önerdiği %15 [13] yerine Cohen’in önerdiği ve Goldratt ile paralellik gösteren %10 kullanılmıştır [11].

• 25: İşletmenin kendi iş ortamına uygun bir kademe yapması önerilmiştir. Sistem dinamiktir, gerekirse tekrar ayarlanabilecektir.

• 26: Gecikme sebeplerinin Pareto kayıtlarına göre öncelik belirlenerek iyileştirme faaliyetleri odaklanabilecektir.



Şekil 5. S-DBR Üçüncü aşama algoritması

4 Yöntem

Bugün içinde bulunduğumuz sistemler belirsizlik içeren, geri bildirimlerle gelişen-değişen, deterministik olmayan kaotik yapıdadır [41]. Dolayısıyla bu tür sistemler simülasyon yöntemleriyle incelenmeye daha uygundur [42]. Simülasyon tercihinin bir diğer etkeni firmaların artan değişkenliği dikkate alan modeller arasında kaynak-maliyet-zaman zorlukları, olası başarısızlık riskleri gibi faktörleri gözetmesidir [43].

Simülasyonda izlenen üç ana yapı Sistem Dinamikleri (System Dynamics), Etmen Tabanlı (Agent Based) ve Ayrık Olay (Discrete Event) şeklindedir. Piyasadaki simülasyon yazılımları arasında sadece AnyLogic (<https://www.anylogic.com/>) üç yapıyı da eşzamanlı desteklemektedir [44].

Bu çalışmada AnyLogic Personal Learning Edition (PLE) 8.8.2 versiyonu kullanılarak işlem sürelerinde değişkenlik olan kurgusal bir yapıda Yalın-hat dengelemesi ve S-DBR senaryoları literatürde izlenen değerlendirme göstergelerine göre karşılaştırılmıştır. İstatistik değerlendirmeler için Minitab® Statistical Software 21.4.0.0 kullanılmıştır.

4.1 Performans göstergeleri

Üretim sektöründe çoklu ve dinamik darboğazın belirlenmesi için simülasyonla yapılan çalışmada akış süresi, gününde teslim, çizelge stabilitesi, stok miktarı, üretim miktarı ve verim göstergeleri yer almıştır [45].

Üretim sektöründe yapılan bir çalışmada üretime iş emri verilirken iş yükü kontrolü ve DBR yöntemleri simülasyonla kıyaslanmış ve gününde teslim, akış süresi, üretim süresi göstergeleri kullanılmıştır [46].

Talaşlı imalat sektöründe siparişe üretim yapan firmalarda darboğaz belirleme ve etkinleştirme konulu uygulamalı araştırmada gününde teslim, akış süresi, üretim süresi, ara stok miktarı ve servis seviyesi göstergelerine yer verilmiştir [47].

Peru'da metal imalat sektöründen bir KOBİ'de (Küçük ve Orta Boy İşletmeler) simülasyonla yapılan çalışmada arıza ve malzeme eksikleri nedeniyle yaşanan üretim kayıpları incelenmiş, yalın ve toplam kalite gibi tekniklerin birlikte kullanımı önerilmiş, gününde teslim%, çalışılabilir zaman%, üretim adedi, birinci kalite% göstergeleri dikkate alınmıştır [48].

İmalat sektöründe itme-çekme yöntemlerinin simülasyonla karşılaştırıldığı bir çalışmada değerlendirme göstergeleri akış süresi, işletme içi stok miktarı, üretim adedi ve maliyet olmuştur [49].

İspanya'da üretim sektöründen siparişe üretim yapan bir firmada S&OP entegrasyonu konulu yapılan çalışmada değerlendirme maliyet ve gününde teslim göstergeleri kullanılmıştır [50].

Üretim yönetimi yöntemleri karşılaştırılırken literatürde kullanılan göstergelerin verildiği Tablo 3 dikkate alınarak sevk adedi, gününde teslim% ve maliyet yerine işletmenin faaliyetine uyumlu olması açısından toplam gelir göstergeleri seçilmiştir.

4.2 Senaryolar

Birinci senaryoda itme (push) esaslı tipik bir üretim hattının bir bölümünü temsilen 4 istasyondan oluşan model Şekil 6'da gösterilmiştir. Arıza, onarım, bakım, devamsızlık, kalite sorunu, malzeme-onay eksikliği gibi belirsizlikler yok varsayılmıştır. Sadece M1, M2, M3 ve M4 istasyonlarının işlem süreleri minimum 4 saniye, mod 5 saniye ve maksimum 9 saniye olacak şekilde triangular (üçgensel) dağılımla değişken verilmiştir. Montaj hattı 5 saniye mod süresine göre dengelidir. Her istasyon arasında M2yedek, M3yedek, M4yedek olarak sınırsız kapasiteli ara stok alanı tanımlanmıştır. M1 ilk istasyondan önceki stok alanı Planlama olarak isimlendirilmiştir, iş emirleriyle üretim başlangıç noktasıdır. Siparişlerin giriş temposu 2 saniyede bir adet ile 10 saniyede bir adet aralığında ayarlanabilmektedir. İdeal akış süresi 4 istasyon ve ortalama 5 saniye işlem süresiyle 20 saniyedir. Müşterinin gecikme eşiği 20 -50 saniye arasında değiştirilebilmektedir. Satış fiyatı, gecikme halinde iskontolu satış fiyatı, hammadde fiyatı parametriktrir.

Tablo 3. Literatürde kullanılan göstergeler

Yazarlar	Yayın Tarihi	Yayın	Göstergeler
Scholz-Rieter, Windt, Liu	2010	Dergi	Gününde teslim%, akış süresi, çizelge stabilitesi, stok miktarı, üretim miktarı, verim
Thürer, Stevenson, Silva, Qu	2017	Dergi	Gününde teslim%, akış süresi, üretim süresi
Lizarralde-Aiastui, Apaolaza-Perez de Eulate, Mediavilla-Guisasola	2020	Dergi	Gününde teslim%, akış süresi, üretim süresi, ara stok miktarı ve servis seviyesi
Gonzales-Romero, Huamani-Martinez, Quiroz-Flores, Diaz-Garay	2022	Konferans	Gününde teslim%, çalışılabilir zaman%, Üretim adedi, birinci kalite%
Tanhaie	2022	Dergi	Akış süresi, ara stok miktarı, üretim adedi, maliyet
Apaolaza, Orue, Lizarralde, Oyarbide-Zubillaga	2022	Dergi	Gününde teslim%, maliyet

Modelde siparişler 10 saniyede bir adet (0.1 adet/saniye) temposuyla alınmıştır. Üretimde 5 saniyede bir adet (0.2 adet/saniye) kapasite vardır, dolayısıyla üretim kapasitesi talepten yüksektir. Müşterilere tedbirli termin verildiği dikkate alınarak gecikme eşiği 30 saniye seçilmiştir.

İstasyonların verimleri zaman cinsindedir, akış süresi iş emirlerinin histogramı olarak gösterilmiştir, işletme içindeki

stoklar tanımlandıkları noktaların ortalama adetleridir. Hesaplamaların detayları aşağıda listelenmiştir.

$$\text{Gelir} = \text{Gününde teslim adet} * \text{Gününde teslim satış fiyatı} + \text{Gecikmeli adet} * \text{Gecikmeli satış fiyatı} \quad (2)$$

$$\text{Gider} = \text{Planlamaya gelen adet} * \text{Hammadde fiyatı} \quad (3)$$

$$\text{Net Gelir} = \text{Gelir} - \text{Gider} \quad (4)$$

$$\text{Gününde Teslim Oranı \%} = \frac{\text{Gününde teslim adet}}{\text{Toplam teslim adet}} \quad (5)$$

Model 1000 saniye sürelidir, başlangıçta 5 adet sipariş olduğu kabul edilmiştir, 10 saniyede bir adet yeni sipariş geldiği için toplam giriş 105 adet olmuştur. Veri setleri ısınma dönemini hariç tutmak amacıyla son 80 kaydı derlemektedir. Model parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

İkinci senaryoda aynı montaj hattı çekme (pull) esaslı olarak Şekil 7'de gösterildiği gibi modellenmiştir. İş emriyle üretime girişler zaman karşılığı adet olarak sınırlanmış (tampon) ve sevkiyat öncesi son istasyonda değişkenlik iyileştirilirken işlem süresi 6 saniyeye yükseltilerek kısıt oluşturulmuştur.

Sipariş giriş temposu, gecikme eşiği, satış fiyatları, hammadde fiyatı birinci senaryo ile aynıdır. Gelir, gider, gününde teslim oranı hesaplamaları aynı formüllerle yapılmıştır. Bu senaryoda model çalışırken tampon büyüklüğü ayarlanabilmektedir.

Tablo 4. Simülasyon modellerinin parametreleri

Model	M1	M2	M3	M4	Kapasite adet/sn	Talep adet/sn	Gecikme Eşiği
Yalın-hat dengeli	Üçgen dağılım min:4, mod:5, mak:9 saniye/adet				0.2	0.1	30 saniye
S-DBR, tampon yönetim siz	Üçgen dağılım min:4, mod:5, mak:9 saniye/adet		6 saniye/ adet		0.2	0.1	30 saniye

Bu senaryolar AnyLogic PLE 8.8.2 deki 30 farklı rastgele sayı seti için tekrarlı çalıştırılacak, sonuçların normal dağılıma uygunluğu istatistik test edilerek doğrulanacak ve iki yöntem arasında %95 güven seviyesinde anlamlı fark aranarak araştırma sorusu cevaplanacaktır.

5 Bulgular

Yalın-hat dengesi ve S-DBR modelleri 30 farklı rastgele veri setiyle çalıştırıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir. S-DBR yöntemi 30 veri setinin 21 setinde Yalın-hat dengesinde daha yüksek net gelire ulaşmıştır.

Yalın-hat dengesi yönteminde ortalama gününde teslim oranı %82, ortalama net gelir 1088 TL ve ortalama sevk 99 adet olmuştur.

S-DBR yönteminde tüm göstergelerde iyileşme vardır; ortalama gününde teslim oranı %84, ortalama net gelir 1132 TL ve ortalama sevk 102 adettir.

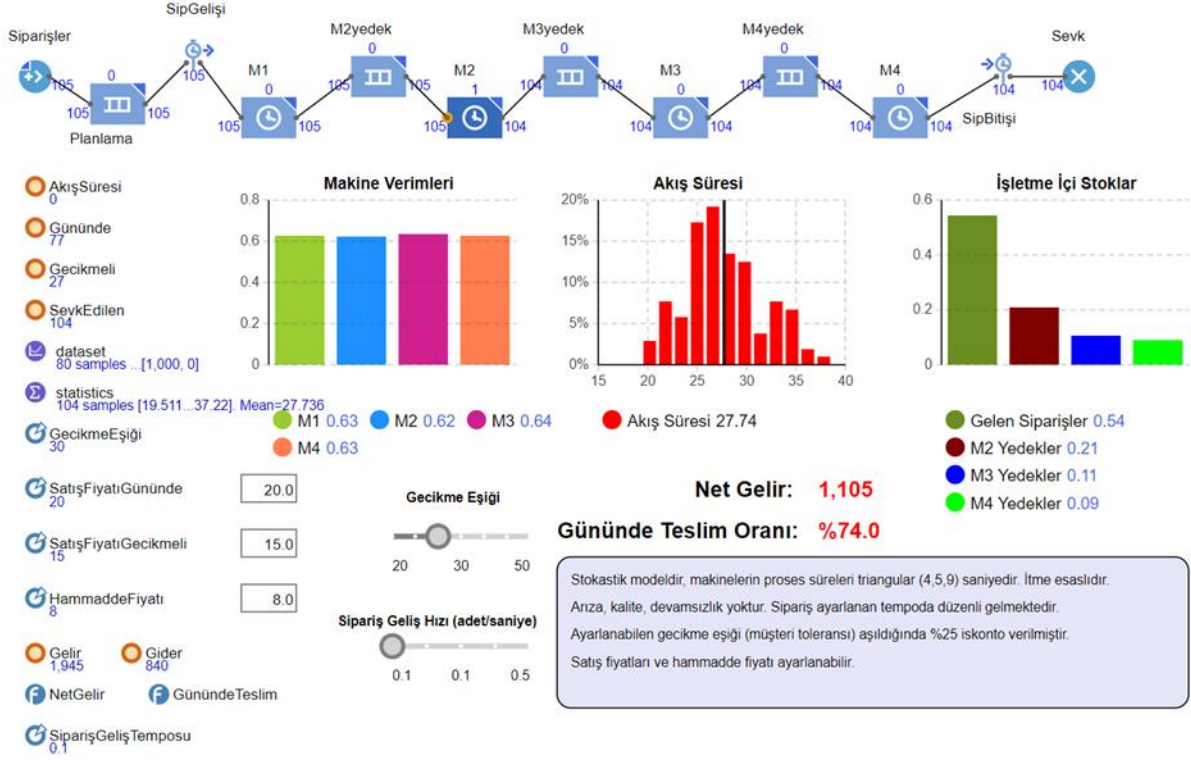
30 farklı setle elde edilen sonuçlar için Minitab ile %5 anlam seviyesinde uygunluk testi Yalın-hat dengesi için

Şekil 8'de gösterilmiştir. Net Gelir sonucunun testte hesaplanan p değeri 0.094 ile $\alpha = 0.05$ ' ten büyüktür, sola çarpık görünüme rağmen normal dağılıma uygunluk reddedilememiştir. Benzer şekilde Gününde Teslim% sonucunun test p değeri 0.88 dir ve $\alpha = 0.05$ ten büyük olduğu için normal dağılıma uygunluk reddedilememiştir.

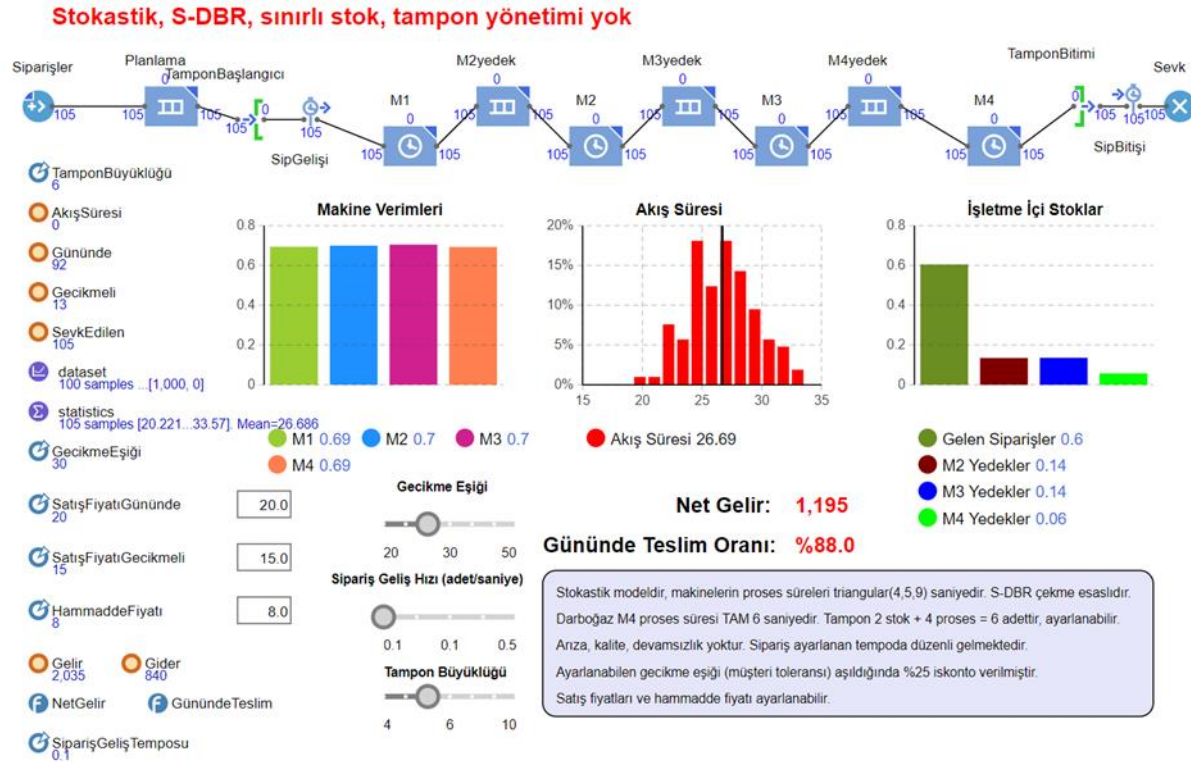
Tablo 5. Farklı rastgele sayı data setlerinin toplu sonuçları

RSS No	Yalın-Hat Dengesi			S-DBR tampon yönetimsiz		
	GT%	NG TL	Adet	GT%	NG TL	Adet
1	%74	1105	104	%88	1195	105
2	%96	1116	96	%91	1000	90
3	%90	1039	93	%93	1113	97
4	%98	1182	100	%89	1200	105
5	%76	1135	105	%91	1215	105
6	%71	1110	105	%93	1089	95
7	%78	999	94	%75	1110	104
8	%92	1096	96	%91	1215	105
9	%84	1140	103	%68	1090	105
10	%85	1180	105	%70	1100	105
11	%75	1130	105	%88	1084	96
12	%80	1135	104	%72	1115	105
13	%65	1028	102	%87	1060	94
14	%83	1095	99	%96	1240	105
15	%79	1000	95	%71	1110	105
16	%80	1104	101	%91	1215	105
17	%84	1175	105	%92	1220	105
18	%88	950	86	%85	1180	105
19	%82	1165	105	%83	1170	105
20	%76	954	92	%89	998	90
21	%82	1078	98	%91	1080	94
22	%81	979	90	%90	1205	105
23	%92	1068	95	%91	1064	94
24	%79	1150	105	%92	1220	105
25	%64	1070	105	%50	1000	105
26	%71	1011	99	%66	1065	104
27	%90	1023	89	%74	1125	105
28	%77	1140	105	%74	1125	105
29	%83	1170	105	%96	1176	101
30	%91	1123	98	%93	1181	102
Ort:	%82	1088	99	%84	1132	102
Std:	%8	69	6	%11	72	5

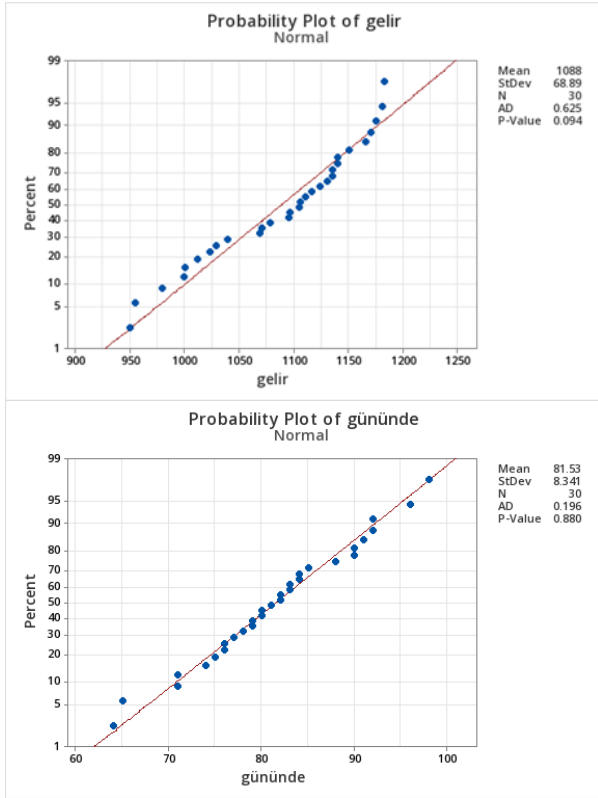
RSS: Rastgele Sayı Seti, GT%: Gününde Teslim%, NG TL: Net Gelir TL, Ort: Ortalama, Std: Standart Sapma



Şekil 6. Yalın-hat dengeli üretim hattı modeli (AnyLogic PLE ver 8.8.2'den yazarlar tarafından oluşturulmuştur)



Şekil 7. S-DBR tampon yönetimsiz üretim hattı modeli (AnyLogic PLE ver 8.8.2'den yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)



Şekil 8. Yalın-hat dengesi simülasyon sonuçlarının normallik testleri (Minitab ver 21.4.0.0 ile yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Benzer şekilde S-DBR simülasyon sonuçları için Minitab ile %5 anlam seviyesinde yapılan uygunluk testi Şekil 9’ da gösterilmiştir. Net Gelir sonucunun teste hesaplanan p değeri 0.067 ile $\alpha = 0.05$ ’ ten büyüktür, sola çarpık görünümüne rağmen normal dağılıma uygunluk reddedilememiştir. Gününde Teslim% sonucunun test p değeri $\alpha = 0.05$ ten küçüktür, normal dağılıma uygun değildir.

İki yöntemin performans karşılaştırması Net Gelir, Gününde Teslim oranı ve sevk adedi göstergeleriyle yapılacaktır. Net Gelir için hipotezler aşağıdaki gibidir:

- H_0 : Yalın-hat dengesinin geliri S-DBR gelirine denktir.
- H_1 : Yalın-hat dengesinin geliri, S-DBR gelirinden düşüktür.

Minitab çiftli t test sonucunda $p = 0.008$ hesaplanmıştır, $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinden küçük olduğu için H_0 reddedilecektir: S-DBR ile net gelir, Yalın-hat dengesine göre %4 artmıştır.

Diğer gösterge olan gününde teslim oranı için hipotezler aşağıda gösterilmiştir:

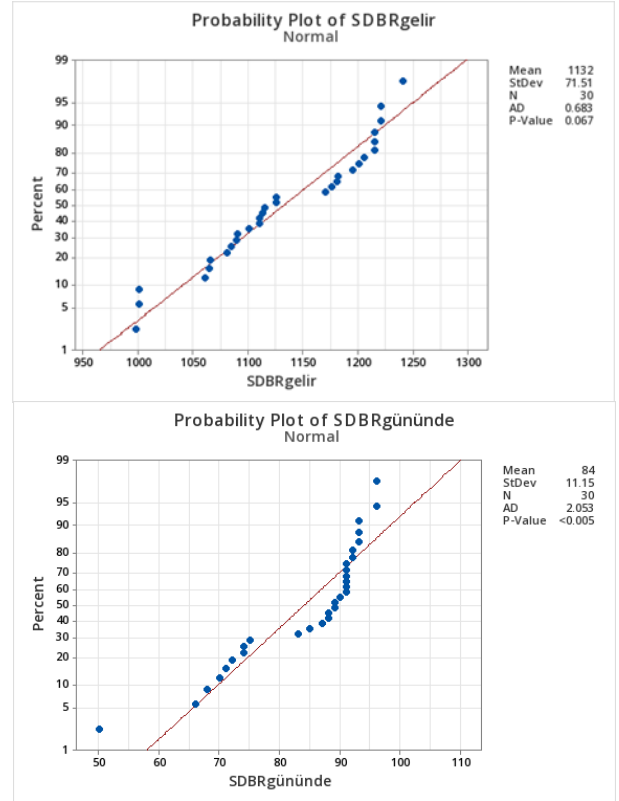
- H_0 : Yalın-hat dengesinin gününde teslim oranı S-DBR gününde teslim oranıyla denktir.
- H_1 : Yalın-hat dengesinin gününde teslim oranı S-DBR gününde teslim oranından düşüktür.

Minitab test sonucunda $p = 0.119$ hesaplanmıştır, $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinden büyük olduğu için H_0 reddedilememiştir: S-DBR ile Yalın-hat dengesinin gününde teslim oranları denktir.

Son gösterge olan sevk adedi için hipotezler aşağıda gösterilmiştir:

- H_0 : Yalın-hat dengesinin sevk adedi S-DBR sevk adediyle denktir.
- H_1 : Yalın-hat dengesinin sevk adedi S-DBR sevk adedinden düşüktür.

Minitab test sonucunda $p = 0.046$ hesaplanmıştır, $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinden küçük olduğu için H_0 reddedilecektir: S-DBR ile Yalın-hat dengesinden %3 daha fazla sevk edilmiştir.



Şekil 9. S-DBR simülasyon sonuçlarının normallik testleri (Minitab ver 21.4.0.0 ile yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

6 Tartışma

Tablo 5’ teki sonuçlar yöntem bazında incelendiğinde tek göstergeyle değil tüm göstergelerle birlikte değerlendirmenin daha uygun olacağı görülmektedir. Yalın-hat dengesi yönteminin 6 ve 7 numaralı veri setleri Tablo 6’da hatırlatılmıştır. Karşılaştırmada gününde teslim oranı artarken net gelirin azalmasının nedeni sevk miktarının 105 adetten 94 adede düşmesidir.

Tablo 6. Veri tutarlılığı

RSS No	Yalın-Hat Dengesi			S-DBR tampon yönetimsiz		
	GT%	NG TL	Adet	GT%	NG TL	Adet
6	%71	1110	105	%93	1089	95
7	%78	999	94	%75	1110	104

RSS: Rastgele Sayı Seti, GT%: Gününde Teslim%, NG TL: Net Gelir TL

Tablo 6'daki 6 numaralı veri seti için S-DBR yönteminde gününde teslim %93 ile Yalın-hat dengesindeki %71 oranından daha yüksektir. Buna rağmen net gelirin 1089TL ile Yalın-hat dengesindeki 1110TL den düşük olmasının sebebi sevk miktarındaki 10 adetlik azalmadır.

Simülasyon sonuçları Yalın-hat dengesi modelinde net gelir ve gününde teslim oranları için normal dağılıma benzerlik sağlamıştır. Ancak sonuçlar S-DBR modelinde net gelir için normal dağılıma benzer olmakla birlikte gününde teslim için yeterli tekrara ulaşamamıştır. AnyLogic PLE 8.8.2 versiyonunda daha fazla tekrar olanağı yoktur, gelecek çalışmalarda S-DBR tam fonksiyonlu olarak modellendiğinde sonuçların normal dağılıma benzerlik göstereceği umulmaktadır.

Yalın-hat dengesi ve S-DBR yöntemlerinin performans farkları için Minitab ile $\alpha = 0.05$ anlam seviyesinde yapılan çiftli t testi sonuçlarına göre S-DBR yöntemi, Yalın-hat dengesi yönteminden net gelirden %4 ve sevk miktarında %3 daha iyi performans göstermiştir. Mevcut S-DBR modelinde dinamik tampon yönetimi gibi unsurlarının yer almaması, değişkenliğin sınırlı olması, tek ürün ve tek hat kurgusu gibi nedenlerle gününde teslim performansında görülen 2 puanlık artış anlamlı bir fark olarak değerlendirilmemiştir.

Scholz-Rieter vd. [45] sürecin içinde dinamik olarak darboğazı belirlemenin önemi üzerinde durmuşlardır, simülasyon modelleri için herhangi bir performans sonucu paylaşmamışlardır.

Bu çalışmadaki kurgu Thüerer vd. [46] akış süresine göre gecikme hesabı, akış tipi üretim ve ciddi (severe) dereceli kısıt versiyonuyla benzerlik göstermektedir. Thüerer ve arkadaşları 7 istasyonlu, gecikme eşiği düzgün dağılımla değişkenlik gösteren ve çizelgeleme yöntemleri bazında bir model oluşturmuştur. Karşılık gelen tek gösterge gününde teslim oranıdır, belirgin bir oran verilmemiştir, % cinsinden fark görülmediği ancak ortalama gecikme süresinin DBR ile azaldığı raporlanmıştır.

Lizarralde-Aiastui vd. [47] uygulamalı çalışmalarında akış süresinin %10, işletme içi stokların %40, kalite şikayetlerinin %20 azaldığını ve servis seviyesinin (gününde teslim) %50' den %70' e yükseldiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada net gelir %4, üretim (sevk) %3, gününde teslim %2 artmıştır

Gonzales-Romero vd. [48] farklı teknikleri farklı amaçlar için kullandıkları çalışmalarında gününde teslim için DDMRP (Demand Driven MRP: Talebe Duayrlı Malzeme İhtiyaç Planlaması) yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem üretimde DBR ile benzerlik içerir. Gününde teslim oranının %30'dan %59' a yükseldiği raporlanmıştır. Bu çalışmadaki S-DBR modellemesinde S-DBR yönteminin tüm fonksiyonları uygulamaya alınamamıştır ve alternatif uygulama olan Yalın-hat dengelemesi Gonzales-Romero çalışmasına göre çok daha yüksek bir karşılaştırma seviyesi sağlamıştır.

Schragenheim ve Dettmer genelde TOC, özelde DBR uygulamasıyla elde edilen sonuçları küresel ölçekte 80 firmayla yapılan bir ankete dayanarak gününde teslimde 13 firmayla %44 iyileşme, 34 firmayla akış süresinde %70 kısalma, 14 firmayla üretimde %65 artış şeklinde özetlemektedir [13,14].

Pirasteh 2005 yılında iki yılı aşkın süre zarfında 21 firmada (11 firma 6sigma, 4 firma yalın, 6 firma Yalın-6sigma-Kısıtlar Teorisi karma) yapılan çalışmada elde edilen tasarrufun %89'unun karma uygulamadan geldiğini raporlamıştır. Sürekli iyileştirme kavramı içinde bu yöntemler birbirinin rakibi değil, tamamlayıcıdır [2].

Apaolaza vd. [50] S&OP kavramını TOC ile ilişkilendirdikleri çalışmalarında belirsizliğin giderek arttığı günümüz iş ortamında satış ve üretimin pazar eğilimleri ve kapasite kısıtları üzerinden yakın ve bütüncül bir yaklaşım gerektirdiğini belirtmişlerdir. S-DBR uygulamasındaki planlanan iş yükü ve emniyetli termin uygulamaları S&OP işleyişiyle uyumludur. Firmaların üretim sürecinde hızlanmaları stok için üretimden (MTS:Make To Stock) siparişe üretime (MTO:Make To Order) geçişi sağlayabilecektir.

Corominas vd belirsizlik ortamında Tip E hat için karışık tam sayılı programlama ve sezgisel çözümleri karşılaştırmış ancak bu çalışmayla kıyaslanabilecek bir performans kriteri göstermemiştir [16]. Bu çalışma Tip F hat içindir.

Uyanık'ın çalışmasında hat duruşlarının %48 azaldığı belirtilmekle beraber toplam çalışan sayısı ve günlük üretim adedinin aynı kaldığı görülmektedir [30]. Oysa bu çalışmada hat verimi yerine gününde teslim öncelenerek %4 net gelir ve %3 üretim artışı sağlanmıştır.

Lopes vd çalışmasında akış tipi farklılıkları dikkate alınmış, ortalama %3.25 üretim artışı rapor edilmiştir [31], aynı zamanda S-DBR çözümünün tampon yönetimi içeriği desteklenmiştir. Bu çalışmada da %3 üretim artışıyla sonuç benzerliği vardır.

Portioli-Staudacher vd iş emirlerinin verilmesini sıralarken bu çalışmadaki S-DBR benzeri bir uygulamadan söz etmekte, gününde teslim ve üretim miktarı gibi benzer parametrelerde işgücü esnekliğine bağlı olarak grafik üzerinde iyileştirme göstermektedir [32].

7 Sonuç ve öneriler

“İşlem sürelerinde değişkenlik varken S-DBR ile Yalın-hat dengelemesinden daha yüksek performans sağlanabilir mi?” şeklindeki araştırma sorusunun cevabı iş ortamına uygun olmak kaydıyla olumludur. Daraltılmış bir ortamdaki simülasyon karşılaştırması $\alpha = 0.05$ seviyesinde daha fazla üretim ve gelir sağlayabilmiştir.

VUCA (Volatile- Uncertain- Complex- Ambiguous: Değişken- Belirsiz- Karmaşık- Muğlak) ortamı üretim ve dağıtım yapan firmaların üretim planlama ve yönetiminde zorlanmasına yol açmaktadır. Tedarik zincirinde dayanıklılık (resilience) fikri öne çıkmaktadır.

Küresel ölçekte arzın talebi aşması nedeniyle rekabet artmıştır. Gününde teslim edebilmek, kısa sürede üretebilmek firmaları stok yerine siparişe üretim yapabilir hale getirecek, stokların finansal yükünü azaltarak rekabet gücünü artıracaktır. Üretim planlama ve yönetiminde DBR yaklaşımı firmalara ilave yatırım yapmadan üretim artışı sağlayabilecektir.

Bu çalışmadaki simülasyon modelleri tekrar edilebilirliği kolaylaştırmak amacıyla AnyLogic Cloud üzerinde serbest erişime açılmıştır. Şekil 6'da gösterilen yalın-hat dengeli

model [51] adresinden ve Şekil 7’de gösterilen S-DBR model [52] adresinden çalıştırılabilir.

Bu çalışmanın limitasyonları arasında AnyLogic PLE 8.8.2 versiyonunun kısıtlı kapasitesi, model kurgusunun kısıtlı değişkenlik içermesi, tek ürün ve tek hattan oluşması sayılabilir.

Gelecekte daha fazla değişkenlik faktörü, farklı değişkenlik seviyeleri, akış süresi yerine terminli sipariş listesiyle gününde teslim, tek ürün yerine çok ürünlü siparişler, tek hat yerine çok hatlı üretim, akış yerine atölye üretim yapısı, dinamik tampon yönetimi, tek bir firma yerine tedarik zinciri kurgusu içeren araştırmalar yapılması önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] F. Betti and P. Hong, A Global Rewiring: Redefining Global Value Chains for the Future. World Economic Forum, Geneva, 2023.
- [2] R. Pirasteh and R. Fox, Profitability With No Boundaries. American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee, 2011.
- [3] T. Ohno, Toyota Ruhü- Toyota Üretim Sistemi. Scala Yayıncılık, İstanbul, 2018.
- [4] J. H. Blackstone, Ed., APICS Dictionary, 13 ed. APICS-The Association for Operations Management, Chicago, 2010.
- [5] M. Rother and R. Harris, Sürekli Akış Yaratmak-Yöneticiler, Mühendisler ve Üretim Çalışanları İçin Bir Eylem Kılavuzu. The Lean Enterprise Institute, Massachusetts, 2001.
- [6] D. Smith, The Measurement Nightmare-How the TOC Can Resolve Conflicting Strategies, Policies and Measures. The St. Lucie Press/APICS Series on Constraints Management, Boca Raton, 2000.
- [7] E. M. Goldratt, Introduction to TOC-My Perspective. in Theory of Constraints Handbook, J. F. Cox III and J. G. Schleier, Eds., McGraw-Hill, pp. 3-9, New York, 2010.
- [8] E. M. Goldratt, Standing on the Shoulders of Giants. The Manufacturer, 2009.
- [9] E. M. Goldratt, The Unbalanced Plant. Twenty-fourth Annual International Conference Proceedings, Boston, 1981.
- [10] J. Bicheno, The New Lean Toolbox-Towards Fast, Flexible Flow, Production and Inventory Control. Systems and Industrial Engineering Books, Buckingham, 2004.
- [11] O. Cohen, Ever Improve- A Guide to Managing Production the TOC Way. Ivancna: TOC Strategic Solutions, 2010.
- [12] E. Schragenheim, From DBR to Simplified-DBR for Make-to-Order. in Theory of Constraints Handbook, J. F. Cox III and J. G. J. Schleier, Eds., McGraw-Hill, pp. 211-238, New York, 2010.
- [13] J. H. J. Blackstone, A Review of Literature on Drum-Buffer-Rope, Buffer Management and Distribution. in Theory Of Constraints Handbook, J. F. Cox III and J. G. Schleier, Eds., McGraw-Hill, pp. 145-173, New York, 2010.
- [14] E. Schragenheim and H. Dettmer, Manufacturing at Warp Speed- Optimizing Supply Chain Financial Performance. Boca Raton: St. Lucie Press/APICS series on constraints management, 2001.
- [15] Ş. Demirkol Akyol, Tip-2 Montaj Hattı Dengeleme ve İşgücü Atama Problemi için Doğrusal Programlama Yaklaşımı: Bir Vaka Çalışması. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 25(73), 121-129, 2023. [10.21205/deufmd.2023257310](https://doi.org/10.21205/deufmd.2023257310)
- [16] A. Corominas, A. Garcia-Villoria and R. Pastor, Improving the Resolution of the Simple Assembly Line Balancing Problem Type E. Statistics and Operations Research Transactions, 40(2), 227-242, 2016.
- [17] M. C. A. Ritt, Improved Integer Programming Models for Simple Assembly Line Balancing and Related Problems. International Transactions in Operational Research, 25, 1345-1359, 2015. [10.1111/itor.12206](https://doi.org/10.1111/itor.12206)
- [18] M. Ritt, A. M. Costa and C. Miralles, The Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem with Stochastic Worker Availability. International Journal of Production Research, 54(3), 9007-922, 2015. [10.1080/00207543.2015.1108534](https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1108534)
- [19] Z. Zhang and W. Cheng, Teaching assembly line balancing problem by using Lingo Software. Second International Workshop on Education Technology and Computer Science, pp. 663-666, 2010. [10.1109/ETCS.2010.456](https://doi.org/10.1109/ETCS.2010.456)
- [20] B. N. Şahin and E. Kahya, Hedef programlama problemi ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelemesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(ÖS: Ergonomi2017), 188-196, 2018. [10.21923/jesd.358709](https://doi.org/10.21923/jesd.358709)
- [21] K. G. H. Ağpak, Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Programlama Yaklaşımı. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 29-40, 2002.
- [22] S. Kökhan, Farklı tipte işgücüne sahip maliyet yönelimli paralel montaj hattı dengeleme problemi için modelleme ve çözüm. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2020.
- [23] G. Kumar and P. Gowda, An optimal balancing of assembly line using Rpw Technique. International Journal of Engineering Research And Advanced Technology, 1, 469-475, 2016.
- [24] G. Çalışkan, Bir tekstil işletmesinde simülasyon optimizasyon yaklaşımı ile hat dengeleme çalışması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2020.
- [25] G. Kılıç, Hazır giyim işletmelerinde üretim hattı dengelemesine yönelik bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [26] K. Nahar, A. Habib, A. A. Nayon and M. Hossain, Assembly line balancing using ACO Algorithm and

- RPW Method: A Comparative case study. *Journal of Modern Science and Technology*, 6(3), 13-24, 2018.
- [27] K. Ağpak, H. Gökçen, N. N. Saray and S. Özel, Stokastik görev zamanlı tek modelli U tipi montaj hattı dengeleme problemleri için bir sezgisel. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(4), 115-124, 2002.
- [28] S. T. Ghutukade and S. M. Sawant, Use of ranked position weighted method for assembly line balancing. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies / II / IV / July-Sept*, 1(3), 2013.
- [29] M. S. Khan and J. P. Saurabh, Evaluation of standard time with the application of rank positional weighted method in the production line. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 7(2), 73-80, 2017.
- [30] A. Ş. Uyanık, Bir traktör fabrikasında karışık modelli montaj hattı dengeleme-deterministik ve stokastik ölçümlere göre analizler. Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2020.
- [31] T. C. Lopes, A. S. Michelsa and C. G. S. Sikorab, Balancing and cyclically sequencing synchronous, asynchronous, and hybrid unpaced assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 203, 216-224, 2018. [10.1016/j.ijpe.2018.06.012](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.06.012)
- [32] A. Portioli-Staudacher, F. Costa and M. Thürer, The use of labour flexibility for output control in workload controlled flow shops A simulation analysis. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11, 429-442, 2020. [10.5267/j.ijec.2019.11.004](https://doi.org/10.5267/j.ijec.2019.11.004)
- [33] S. Yoon and S. Jeong, Line Balancing Strategy for Re-Entrant Manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 31(1), 42-51, 2018. [10.1109/tsm.2017.2768242](https://doi.org/10.1109/tsm.2017.2768242)
- [34] N. Zheng and L. Xiaochun, Comparative study on push and pull production system based on Anylogic. in *International Conference on Electronic Commerce and Business Intelligence*, 2009. [10.1109/ecbi.2009.26](https://doi.org/10.1109/ecbi.2009.26)
- [35] B. Mendenhall, Creating Perfect Harmony - How to Solve the Discords of TOC and LSS. 2008.
- [36] M. Rother and J. Shook, Görmeyi Öğrenmek, Ver 1.2-değer yaratmak ve israfi ortadan kaldırmak için değer akışı haritalama. The Lean Enterprise Institute, Massachusetts, 1999.
- [37] E. M. Goldratt and J. Cox, Amaç-Sürekli İyileştirme Süreci. Optimist Yayınları-İstanbul: North River Press, 1984.
- [38] H. W. Dettmer, The Logical Thinking Process. Milwaukee, USA: ASQ Quality Press, 2007.
- [39] E. M. Goldratt and R. E. Fox, The Race. New York: North River Press, 1986.
- [40] C. Roser, All About Lean-Organize your Industry!, 2014. <https://www.allaboutlean.com/drum-buffer-rope/>. Accessed Mayıs 2023.
- [41] Z. Sardar and I. Abrams, Kaos: Düzensizlikteki Düzen., İstanbul: NTV Yayınları, 1998.
- [42] J. H. Holland, Signals & Boundaries: Building Blocks For Complex Adaptive Systems., Londra: The MIT Press, 2012.
- [43] M. Gökçen, A. Boru and A. T. Dosdoğru, İki Aşamalı Tedarik Zincirinde Eş Zamanlı Stok Kontrolünün ve Tedarikçi Seçiminin Simülasyon Optimizasyonu Yaklaşımı ile Analizi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2018. [10.7212/2Fzkufbd.v8i1.617](https://doi.org/10.7212/2Fzkufbd.v8i1.617)
- [44] informs: Simulation Software Survey, 2017. <https://www.informs.org/ORMS-Today/OR-MS-Today-Software-Surveys/Simulation-Software-Survey>. Accessed Mayıs 2023.
- [45] B. Scholz-Rieter, K. Windt and H. Liu, (DET2009) Modelling Dynamic Bottlenecks in Production Networks. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, no. 1, 2010. [10.1080/0951192x.2010.511655](https://doi.org/10.1080/0951192x.2010.511655)
- [46] M. Thürer, M. Stevenson, C. Silva and T. Qu, Drum-buffer-rope and workload control in high-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation. *International Journal of Production Economics*, no. 188, pp. 116-127, 2017. [10.1016/j.ijpe.2017.03.025](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.025)
- [47] A. Lizarralde-Aiastui, U. Apaolaza-Perez de Eulate and M. Mediavilla-Guisasola, A Strategic Approach for Bottleneck Identification in Make-To-Order Environments: A Drum-Buffer-Rope Action Research Based Case Study. *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 13, no. 1, pp. 18-37, 2020. [10.3926/jiem.2868](https://doi.org/10.3926/jiem.2868)
- [48] A. Gonzales-Romero, I. J. Huamani-Martinez, J. C. Quiroz-Flores and B. H. Diaz-Garay, Production management model based on Lean and DDMRP tools to increase the rate of project compliance in manufacturing SMEs in the metalworking sector. in *8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, 2022. [10.1109/IESTEC54539.2022.00015](https://doi.org/10.1109/IESTEC54539.2022.00015)
- [49] F. Tanhaie, Comparison Between the Performances of Pull and Push Systems Using Discrete Event Simulation. *Journal of Systems Thinking in Practice*, vol. 1, no. 2, pp. 44-55, 2022. [10.22067/JSTINP.2022.77835.1015](https://doi.org/10.22067/JSTINP.2022.77835.1015)
- [50] U. Apaolaza, A. Orue, A. Lizarralde and A. Oyarbide-Zubillaga, Competitive Improvement through Integrated Management of Sales and Operations. *Sustainability*, no. 14-2722, 2022. [10.3390/su14052722](https://doi.org/10.3390/su14052722)
- [51] Yalın-hat dengeli model erişim adresi: <https://cloud.anylogic.com/model/194f3e34-bc74-4289-9577-2394cea5d0c5?mode=SETTINGS&tab=GENERAL>
- [52] S-DBR model erişim adresi: <https://cloud.anylogic.com/model/3d090860-dae8-4f75-92d7-20415cc20a03?mode=SETTINGS&tab=GENERAL>





Mathematical correlations for variation in heat release rate of a diesel engine fuelled with n-octanol blends

n-Oktanollu karışımlarıyla çalışan bir dizel motorun ısı yayılımı oranının değişimi için matematiksel korelasyonlar

Mert Gülüm^{1,*} 

¹ Karadeniz Technical University, Mechanical Engineering Department, 61080, Trabzon, Türkiye

Abstract

The current literature reports a few papers regarding the prediction of heat release rate of a diesel engine fuelled with n-octanol blends using numerical methods. To address this gap, the main objective of the presented study is to derive correlations for estimating the variation in heat release rate of a diesel engine fuelled with diesel fuel and diesel fuel-biodiesel-n-octanol blends. For this purpose, three different ternary blends were prepared by varying the n-octanol concentration to 6% (OCT6), 8% (OCT8), and 10% (OCT10) by volume. The estimation of heat release rate was accomplished using the least-squares regression (sine, piecewise, and rational equations) and the function approximation (Padé approximation) methods. The ignition delay and peak heat release rate increased by 3.8462%, 5.9501% for OCT6; 7.6923%, 3.7125% for OCT8; and 8.9744%, 3.0755% for OCT10, respectively, compared to diesel fuel. The peak cylinder pressure of OCT6 and OCT8 was observed to be higher by 2.4378% and 1.3982%, respectively, whereas that of OCT10 was found to be lower by 1.9458%, compared to diesel fuel. Compared to the others, the suggested rational equation qualitatively and quantitatively achieved the best correlation with all experimental heat release rate data measured by both the author and some other authors.

Keywords: n-Octanol, Heat release rate, Sine equation, Padé approximation, Piecewise equation

1 Introduction

The ever-growing energy demand worldwide, the rise in environmental concerns (global warming), and the volatility of petroleum prices have led to a growing interest in alternative fuels [1, 2]. Among the alternative fuels for diesel engines, biodiesel and higher alcohols have been focused on in this study. Biodiesel is a type of fuel composed of mono-alkyl esters of long-chain fatty acids. Biodiesel is produced by the transesterification of animal fats or vegetable oils. Biodiesel has been gaining attention for decades because of its many advantages over diesel fuel (being renewable, biodegradable, non-toxic, and having a higher flash point) [3, 4]. Higher alcohols have been used as an additive to diesel fuel and biodiesel [5]. Among higher

Öz

Mevcut literatür, n-oktanol karışımları ile çalışan bir dizel motorun ısı yayılımı oranının sayısal yöntemlerle tahmin edilmesiyle ilgili birkaç makale sunmaktadır. Bu boşluğu gidermek için, sunulan çalışmanın temel amacı, dizel yakıtı ve dizel yakıtı-biyodizel-n-oktanol karışımları ile çalışan bir dizel motorun ısı yayılımı oranındaki değişimi tahmin etmek için korelasyonlar elde etmektir. Bu amaçla n-oktanol miktarı hacimsel olarak %6 (OCT6), %8 (OCT8) ve %10 (OCT10) oranlarında değiştirilerek üç farklı üçlü karışım hazırlanmıştır. Isı yayılımı oranının tahmini, en küçük kareler regresyonu (sinüs, parçalı ve rasyonel denklemler) ve fonksiyon yaklaşımı yöntemleri (Padé yaklaşımı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tutuşma gecikmesi ve en yüksek ısı yayılımı oranı, dizel yakıtına kıyasla sırasıyla, OCT6 için %3.8462, %5.9501; OCT8 için %7.6923, %3.7125; ve OCT10 için %8.9744, %3.0755 oranlarında artmıştır. Dizel yakıtına kıyasla, OCT6 ve OCT8'in en yüksek silindir basınçlarının %2.4378 ve %1.3982 oranlarında daha yüksek olduğu, OCT10'un ise %1.9458 oranında daha düşük olduğu görülmüştür. Diğer denklemler ile karşılaştırıldığında, önerilen rasyonel denklem, nitelik ve nicelik olarak hem yazar hem de diğer bazı yazarlar tarafından ölçülen tüm deneysel ısı yayılımı oranı verileriyle en iyi korelasyonu sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: n-Octanol, Isı yayılımı oranı, Sinüs denklemi, Padé yaklaşımı, Parçalı denklem

alcohols, n-octanol is a next-generation biofuel produced from renewable lignocellulosic biomass [6]. It has a higher cetane number and heating value (39 and 37.53 MJ/kg) than methanol, ethanol, n-butanol, and n-pentanol. Because of its superior hydrophobic nature, n-octanol is likely to cause less corrosion in fuel lines than n-butanol, n-pentanol, and n-hexanol [7]. The higher flash point temperature (81°C) and lower vapor pressure of n-octanol make it safer for storage and transport than diesel fuel [8]. Unlike ethanol and methanol, which are hydrophilic and tend to phase separate when mixed with diesel fuel, n-octanol exhibits high miscibility in diesel fuel. This property offers an encouraging opportunity to replace diesel fuel with a higher proportion of biofuel than methanol and ethanol [9]. Compared to biodiesels, n-octanol generally exhibits superior cold flow

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gulum@ktu.edu.tr (M. Gülüm)

Geliş / Received: 29.06.2023 Kabul / Accepted: 31.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1320921

characteristics, as evidenced by its pour point of -13.5°C [10]. The use of n-octanol generally results in very low soot emissions owing to its high oxygen concentration (12.41%) [8]. Owing to the superior fuel properties of n-octanol, it has been the subject of extensive research in recent years as follows: Sidharth and Kumar [11] prepared three ternary blends (80% diesel fuel-10% waste cooking oil biodiesel-10% n-octanol, 70% diesel fuel-20% waste cooking oil biodiesel-10% n-octanol, and 70% diesel fuel-10% waste cooking oil biodiesel-20% n-octanol, v/v) and two binary blends (90% diesel fuel-10% waste cooking oil biodiesel, and 90% diesel fuel-10% n-octanol, v/v). They investigated the effects of ternary and binary blends on the performance, emission and combustion characteristics of a single-cylinder diesel engine under different brake mean effective pressures. The blend of 80% diesel fuel-10% waste cooking oil biodiesel-10% n-octanol exhibited improved brake thermal efficiency and brake specific energy consumption, compared to diesel fuel. Ashok et al. [12] researched the impacts of n-octanol-biodiesel blends. Five different blends were prepared by varying the n-octanol concentration from 10% to 50% on a volumetric basis. These blends were tested and compared with pure diesel fuel at different engine loads (0%, 25%, 50%, and 100%) and 1500 rpm. According to the results, increasing the amount of n-octanol led to a longer ignition delay, resulting in a higher cylinder peak pressure. The use of n-octanol increased carbon monoxide and smoke emissions and decreased nitrogen oxide emissions. Sekar et al. [13] investigated the effects of O10NBD90 (10% n-octanol-90% neem biodiesel, v/v) and O20NBD80 (20% n-octanol-80% neem biodiesel, v/v) on the performance, emissions, and combustion of a single-cylinder diesel engine under different brake powers (1.1, 2.2, 3.3, 4.4 and 5.5 kW). Increasing the volume percentage of n-octanol resulted in a higher heat release rate and in-cylinder pressure during premixed combustion. The fuel consumption was reduced by 2.4% with higher n-octanol content. Sharbuddin et al. [14] prepared three ternary blends including diesel fuel (80% v/v), waste cooking oil biodiesel (15% v/v), and oxygenates (5% v/v). Di-n-butyl ether, n-octanol, and 2-ethyl-hexanol were used as the oxygenates. Response surface methodology-based optimization was used to minimize nitrogen oxide and smoke opacity emissions while maximizing engine performance. It was determined that the blend (80% diesel fuel-15% waste cooking oil biodiesel-5% n-octanol) injected at a compression ratio of 19:1 with an EGR rate of 10% provided the best performance and emission characteristics. Konjevic et al. [15] investigated the effects of diesel fuel-n-pentanol and diesel fuel-n-octanol blends on engine performance and exhaust emissions in a diesel engine under different engine speeds and indicated mean effective pressures. The highest increment in specific fuel consumption (10.9%) was determined with the use of a diesel fuel-n-pentanol blend (including 10% n-pentanol v/v) at a low load and medium engine speed. The highest increment in nitrogen oxide emissions (11%) was determined for the use of a diesel fuel-n-pentanol blend (including 30% n-pentanol) under high load and high engine speed. Li et al. [16] performed a numerical analysis to

investigate the effects of n-octanol and di-n-butyl-ether mixtures on the combustion characteristics and formation of emissions in a diesel engine using the KIVA4-CHEMKIN code. Various n-octanol-di-n-butyl-ether mixtures were prepared by changing the di-n-butyl-ether content from 10% to 90% (with an interval of 10%). The diesel engine was then simulated with pure n-octanol, pure di-n-butyl-ether, and their blends at engine speeds of 1500 rpm and 2280 rpm. Blending more di-n-butyl-ether into n-octanol decreased the ignition delay and the pressure rise rate, increased the peak pressure, and prolonged the combustion duration. Blending di-n-butyl-ether into n-octanol decreased carbon monoxide but increased nitrogen oxide emissions. The optimum di-n-butyl-ether blending ratio was determined to be 50%, resulting in carbon monoxide reductions of 69.91% and 65.98% at 1500 and 2280 rpm.

Considering the other relevant studies in the existing literature [17-19] as well as the literature review mentioned above, the effects of n-octanol blends on the performance, emissions, and combustion characteristics have been frequently investigated in recent decades. However, although accurate knowledge of the change in the heat release rate is essential in internal combustion engine studies to understand the ignition and combustion characteristics of the used fuel, few studies have focused on predicting the heat release rate of diesel engines. To overcome this limitation, this study aims to derive an equation and use the function approximation method (Padé approximation) to estimate the change in the heat release rate of a diesel engine fuelled with diesel fuel and n-octanol blends. In other words, the importance of this study is that it can offer an alternative approach for predicting the heat release rate, considering some technical and economic difficulties in experimentally determining the heat release rate.

2 Material and methods

2.1 Test fuels

The test fuels consist of diesel fuel (DF), biodiesel (vegetable oil methyl ester) [20], and n-octanol. Table 1 and Appendix Table 1 show the properties of n-octanol [7, 21-23] and diesel fuel (DF). Considering the European Directives [24, 25], a binary blend is prepared by combining DF and biodiesel in a volumetric ratio of 80:20 at room temperature. n-Octanol, as an oxygenated fuel additive, is added to the DF-biodiesel binary blend at 6% (OCT6), 8% (OCT8), and 10% (OCT10) by volume to obtain ternary blends at room temperature.

Table 1. Some fuel properties of n-octanol

Properties	n-octanol
Chemical formula	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{OH}$
Molecular weight (g/mol)	130.23
Carbon content (wt.%)	73.68
Hydrogen content (wt.%)	13.91
Oxygen content (wt.%)	12.41
Cetane number	39
Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	195
Lower heating value (MJ/kg)	37.53
Latent heat of evaporation (kJ/kg)	538
Flash point ($^{\circ}\text{C}$)	81
Self-ignition temperature ($^{\circ}\text{C}$)	270
Density at 15°C (kg/m^3)	827
Viscosity at 40°C (mm^2/s)	5.8

A magnetic stirrer is used to obtain all blends for nearly 30 min. All blends are prepared just before conducting the experiments. No phase separation is detected in any of the blends at room temperature. Owing to the high cost of n-octanol (analytical grade) in Turkey and its low cetane number, volume ratios exceeding 10% are not studied.

2.2 Experimental setup and procedure

To conduct the experiments, a single-cylinder diesel engine (Hatz) in the Internal Combustion Engines Laboratory at Karadeniz Technical University is used. The main technical specifications of the diesel engine are listed in Appendix Table 2. Appendix Figure 1 shows the test bed which includes the engine, an electric dynamometer (DC), a fuel tank, and monitoring systems. No modifications are made on the engine or the fuel supply/injection system. To measure the engine torque (± 0.1 Nm) and engine speed (± 1 rpm), a force sensor and an optical encoder are fixed to the electric dynamometer. The data acquisition system, consisting of an engine cycle analyzer, a cylinder head pressure piezoelectric transducer (made by Kistler, sensitivity: ~ 36 pC/bar, measuring range: 0-300 bar, and natural frequency: >70 kHz), and an optical crank angle encoder (with a resolution of 1 crank angle (degree)), collects data (cylinder pressure, cylinder volume, etc.). Cylinder pressure data are taken for every 1 crank angle (degree). The engine is allowed to run for a while at full throttle before measurements are taken to achieve a steady operating condition. All experiments are carried out under steady-state conditions at 1200 rpm, and before running the engine with a new fuel, any remaining fuel from the previous experiment is consumed. All measurements are conducted 20 times to minimize uncertainties. The cylinder pressure data from 50 consecutive engine cycles are averaged. The cylinder head pressure piezoelectric transducer exhibits a linearity of $\leq \pm 0.4$. These factors contribute to the reliability and accuracy of the cylinder pressure data and the results related to the combustion parameters. After measurements are taken for each fuel, the engine is operated with pure diesel fuel to remove any remaining blends from the fuel line. No difficulties are encountered during the engine tests for each fuel [26].

2.3 Calculation of heat release rate

The apparent net heat release rate is the difference between the apparent gross heat release rate and the heat transfer rate to the walls. It is calculated using the following equation:

$$\frac{dQ_n}{d\theta} = \frac{k}{k-1} \cdot P \cdot \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} \cdot V \cdot \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

where $dQ_n/d\theta$ is the apparent net heat release rate (J/degree), k is the ratio of specific heats, P is the instantaneous cylinder pressure (Pa), V is the instantaneous cylinder volume (m^3), θ is the crank angle (degree), $dV/d\theta$ is the derivative of cylinder volume over crank angle ($m^3/degree$), and $dP/d\theta$ is the derivative of cylinder pressure over crank angle (Pa/degree) [27].

2.4 Padé Approximation

The Padé approximation is not an interpolation approach, but a rational approximation (i.e., the quotient of two polynomials) [28, 29]. The Padé approximation seeks to approximate a function ($f(x)$) by finding a rational function that matches the function values and its derivatives at a specific point (x_0) [30]. The desired rational function (the numerator of degree m and the denominator of degree n) takes the following form [29, 30]:

$$r(x) = \frac{p_m(x)}{q_n(x)} = \frac{a_m \cdot x^m + \dots + a_0}{b_n \cdot x^n + \dots + b_0} \quad (2)$$

Assuming that the values of $f(x_0)$, $\hat{f}(x_0)$, ..., $f^{(k)}(x_0)$ are known for $k = m + n$, and x_0 is equal to zero for simplicity [30]. Let $t(x)$ denote the Taylor polynomial of a given function ($f(x)$). The function ($t(x)$) can be written as:

$$t(x) = c_k \cdot x^k + \dots + c_2 \cdot x^2 + c_1 \cdot x + c_0 \quad (3)$$

where c_k equals $f^{(k)}(0)/k!$ in terms of derivatives of $f(x)$. We want $r(x)$ to exactly match $t(x)$ –to have the same value at $x = 0$ and the same derivatives of all orders up to, and including $k = m + n$ [30]. Therefore, the fundamental approach is to utilize the following equivalence of the expressions [30]:

$$t(x) = r(x) = \frac{p_m(x)}{q_n(x)} \quad (4)$$

and

$$q_n(x) \cdot t(x) = p_m(x) \quad (5)$$

Based on Eq. (5), the following relationship is established:

$$(b_n \cdot x^n + \dots + b_0) \cdot (c_k \cdot x^k + \dots + c_1 \cdot x + c_0) = a_m \cdot x^m + \dots + a_0 \quad (6)$$

By considering the requirement that $q_n(0) \cdot t(0) = p_m(0)$, Eq. (6) gives us

$$b_0 \cdot c_0 = a_0 \quad (7)$$

The value of b_0 can be taken as unity [29]. With this convention, an equation is obtained to determine a_0 [30]. Similarly, with the use of derivatives of Eq. (6) at $x = 0$, all unknown coefficients can be determined for the desired rational function ($r(x)$) using the Naive Gauss Elimination method.

3 Results and discussions

Figures 1-5 show the variation in cylinder pressure and heat release rate (HRR) of DF, OCT6, OCT8, and OCT10 as a function of crank angle (degree). In the case of using OCT6, OCT8, and OCT10, the ignition delay is higher by

3.8462%, 7.6923%, and 8.9744% owing to the lower cetane number of n-octanol, compared to DF. The peak cylinder pressures of OCT6 (83.7289 bar) and OCT8 (82.8791 bar) are found to be 2.4378% and 1.3982% higher, respectively, whereas that of OCT10 (80.1459 bar) is found to be 1.9458% lower, compared to DF (81.7363 bar). The peak HRR increases by 5.9501%, 3.7125%, and 3.0755% for the use of OCT6 (28.9586 J/degree), OCT8 (28.3470 J/degree), and OCT10 (28.1729 J/degree), respectively, compared with DF (27.3323 J/degree). The increase in the peak cylinder pressure and peak HRR is linked to the oxygen concentration of n-octanol (enhances the combustion reaction) and the extended ignition delay (causes more fuel accumulation in the combustion chamber). However, the decrease in the peak cylinder pressure associated with OCT10 is due to the lower heating value of n-octanol. In other words, the lower heating value becomes more dominant over the change in cylinder pressure for the highest n-octanol content (10%). As shown in Figures 2-5, the experimental HRR data are correlated by the sine equation (Eq. (8)) and the piecewise equation (Eq. (9)) composed of quadratic and exponential terms using MATLAB and NCSS software [31, 32]:

$$y = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) + a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot x + c_3) + a_4 \cdot \sin(b_4 \cdot x + c_4) + a_5 \cdot \sin(b_5 \cdot x + c_5) \quad (8)$$

$$y = \begin{cases} a_1 + b_1 \cdot x + c_1 \cdot x^2 + (x - d_1) \cdot \text{sign}(x - d_1) \cdot (e \cdot (x + d_1) + f), & x < 0 \\ (a_2 + b_2 \cdot x) \cdot \exp(-c_2 \cdot x) + d_2, & x \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

where x is the crank angle (radian for Eq. (8), degree for Eq. (9)); y is the predicted HRR value; and $a_1, \dots, a_5, b_1, \dots, b_5, c_1, \dots, c_5, d_1, d_2, e$, and f are the regression constants. It can be noted that because HRR shows different characteristics in the negative and positive crank angle (degree) regions, the piecewise equation (Eq. (9)) is used to correlate the HRR data. In addition to the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations, their Padé approximations are also constructed to correlate the HRR data by using Mathematica software. Different numerator and denominator degrees are tried for their Padé approximations, and finally, rational functions with a numerator of degree 2 and a denominator of degree 6 are used in the Padé approximations of the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations for all HRR data. As shown in Figures 1-5, all fuels reveal almost similar characteristics of cylinder pressure and HRR variations depending on crank angle. It should be also noted that the predicted values of DF and OCT8 by Padé approximation of the sine equation slightly deviate from the related experimental data (i.e. the negative HRR values). Table 2 lists the regression constants of the sine (Eq. (8)) and piecewise (Eq. (9)) equations for the author's data. Table 3 lists the regression results of Eq. (8), Eq. (9), and their Padé approximations (r^2 , relative errors (between measured peak HRR data and calculated peak HRR value), and mean absolute errors (between measured HRR

data and calculated HRR values) for the author's data. The average (over the fuel type) r^2 values are calculated to be 0.9983 (the sine equation (Eq. (8))), 0.9852 (Padé approximation of the sine equation), 0.9976 (the piecewise equation (Eq. (9))), and 0.9974 (Padé approximation of the piecewise equation). The average (over the fuel type) relative errors are calculated as 0.9881%, 0.9882%, 0.7388%, and 0.7388% for the sine equation (Eq. (8)), Padé approximation of the sine equation, the piecewise equation (Eq. (9)), and Padé approximation of the piecewise equation, respectively. The average (over the fuel type) mean absolute errors are calculated as 0.3228, 0.8060, 0.2988, and 0.3180 for the sine equation (Eq. (8)), Padé approximation of the sine equation, the piecewise equation (Eq. (9)), and Padé approximation of the piecewise equation, respectively. Considering Figures 2-5, the sine equation (Eq. (8)), the piecewise equation (Eq. (9)), and Padé approximation of the piecewise equation (Eq. (9)) qualitatively agree very well with the experimental HRR data measured by the author. Moreover, the sine equation (Eq. (8)), the Padé approximation of the piecewise equation (Eq. (9)), and the piecewise equation (Eq. (9)) quantitatively outperform in terms of higher average r^2 (0.9983), lower average relative error (0.7388%), and lower average mean absolute error (0.2988) values, respectively. The predictive abilities of the sine equation (Eq. (8)), the piecewise equation (Eq. (9)), and their Padé approximations are evaluated against different experimental HRR data of n-octanol blends measured by Yeşilyurt and Çakmak [8] as well as Çakmak et al. [33]. Yeşilyurt and Çakmak [8] investigated the engine performance and combustion characteristics of a single-cylinder diesel engine fuelled with pure diesel and diesel-n-octanol blends (including 5%, 10%, 15%, and 20% n-octanol by volume) at a fixed engine speed of 1500 rpm and four different engine loads. The variation in HRR was investigated under the full load condition by Yeşilyurt and Çakmak [8]. Çakmak et al. [33] performed the exergy, exergoeconomic, and environmental analysis for a diesel engine fuelled with pure diesel and diesel-biodiesel-n-octanol blends at a constant engine speed (1500 rpm) and different engine loads. n-Octanol was added to the diesel-biodiesel blend at fractions of 5%, 10%, 15%, and 20% by volume [33]. They investigated the variation in heat release rate at the full engine load. Appendix Tables 3 and 4 list the regression constants of the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations for the experimental data measured by Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33]. Appendix Tables 5 and 6 list the regression results of Eq. (8), Eq. (9), and their Padé approximations (r^2 , relative errors (between measured peak HRR data and calculated peak HRR value), and mean absolute errors (between measured HRR and calculated HRR)) for the experimental data measured by Yeşilyurt and Çakmak [8] as well as Çakmak et al. [33]. As shown in Appendix Table 5 for the data measured by Yeşilyurt and Çakmak [8], the average (over the fuel type) r^2 , relative error and mean absolute error values are calculated as 0.9357, 22.8316%, 1.2847; 0.3341, 22.7955%, 5.2281; 0.9512, 6.7514%, 0.9666; and 0.9503, 6.7515%, 0.9903 for the sine equation (Eq. (8)), Padé approximation of the sine equation, the piecewise equation (Eq. (9)), and

Padé approximation of the piecewise equation (Eq. (9)). As shown in Appendix Table 6 for the data measured by Çakmak et al. [33], the average (over the fuel type) r^2 , relative error and mean absolute error values are calculated as 0.9522, 16.4322%, 1.0958; 0.0937, 16.4303%, 5.6557; 0.9793, 4.4275%, 0.7905; and 0.9792, 4.4274%, 0.7977 for the sine equation (Eq. (8)), Padé approximation of the sine equation, the piecewise equation (Eq. (9)), and Padé approximation of the piecewise equation (Eq. (9)). It is not necessary to investigate their qualitative predictive capabilities, because they have relatively high errors and low r^2 values (poor quantitative predictive capability). Considering Appendix Tables 5 and 6, since the sine equation (Eq. (8)), Padé approximation of the sine equation, the piecewise equation (Eq. (9)), and Padé approximation of the piecewise equation yield relatively high errors and low r^2 values (poor prediction accuracy), other piecewise equations (Eqs. (10)-(12)) are tested and fitted to the experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8] as well as Çakmak et al. [33]. Considering the regression results (given in Table 3, Appendix Table 5, and Appendix Table 6), to determine the best correlation for the data measured by both the author and other authors [8, 33], these piecewise equations (Eqs. (10)-(12)) are structured to include both sine, polynomial, and exponential terms (given in Eq. (8) and Eq. (9)).

$$y = \begin{cases} a_1 + b_1 \cdot x + c_1 \cdot x^2 + (x - d_1) \\ \cdot \text{sign}(x - d_1) \cdot (e_1 \cdot (x + d_1) + f_1), x < 0 \\ a_2 + b_2 \cdot x + c_2 \cdot (x - d_2) \cdot \text{sign}(x - d_2) \\ + e_2 \cdot (x - f_2) \cdot \text{sign}(x - f_2), x \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$y = \begin{cases} a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) \\ + a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot x + c_3) \\ + a_4 \cdot \sin(b_4 \cdot x + c_4) \\ + a_5 \cdot \sin(b_5 \cdot x + c_5), x < 0 \\ a_6 + b_6 \cdot x + c_6 \cdot (x - d) \cdot \text{sign}(x - d) \\ + e \cdot (x - f) \cdot \text{sign}(x - f), x \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$y = \begin{cases} a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) \\ + a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot x + c_3) \\ + a_4 \cdot \sin(b_4 \cdot x + c_4) \\ + a_5 \cdot \sin(b_5 \cdot x + c_5), x < 0 \\ (a_6 + b_6 \cdot x) \cdot \exp(-c_6 \cdot x) \\ + d, x \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Tables 4-6 and Appendix Tables 7-12 list the regression constants of Eqs. (10-12) for the experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33]. Table 7, Appendix Table 13, and Appendix Table 14 present the regression results of Eqs. (10)-(12) (r^2 , relative errors (between measured peak HRR and calculated peak HRR), and mean absolute errors (between measured HRR data and calculated HRR values)) for the experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33]. In Table 7 for the author's data, the average values of r^2 , relative error, and mean absolute error are listed as follows: 0.9916,

8.1590%, 0.4007 for Eq. (10); 0.9899, 8.1590%, 0.5276 for Eq. (11); and 0.9959, 0.7388%, 0.4257 for Eq. (12). In Appendix Table 13 for the data measured by Yeşilyurt and Çakmak [8], the average values of r^2 , relative error, and mean absolute error are listed as follows: 0.9583, 6.7514%, 0.6970 for Eq. (10); 0.9900, 5.5069%, 0.4586 for Eq. (11); and 0.9829, 5.5069%, 0.7281 for Eq. (12). In Appendix Table 14 for the data measured by Çakmak et al. [33], the average values of r^2 , relative error, and mean absolute error are listed as follows: 0.9853, 4.4275%, 0.5782 for Eq. (10); 0.9887, 2.7285%, 0.4792 for Eq. (11); and 0.9828, 2.7285%, 0.6916 for Eq. (12). According to these results, among Eqs. (10-12), a correlation with quantitatively sufficient accuracy (relative error of less than 5%, and r^2 of closer to 1.00) is not obtained for all experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33]. Finally, the experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33] are corrected by the following rational equation (x: crank angle (degree)) [31] (Eq. (13)):

$$y = \frac{(a_1 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x + a_4)}{(x^4 + b_1 \cdot x^3 + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x + b_4)} \quad (13)$$

Table 8, Appendix Table 15, and Appendix Table 16 list the regression constants of Eq. (13) for the experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33]. The r^2 , relative error, and mean absolute error (between measured HRR and calculated HRR) values from Eq. (13) for the HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33] are listed in Table 9, Appendix Table 17, and Appendix Table 18. The average values of r^2 , relative error, and mean absolute error arising from Eq. (13) are listed as follows: 0.9978, 0.6158%, 0.3178 for the author's data; 0.9939, 1.2185%, 0.4626 for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]; and 0.9884, 1.5837%, 0.5991 for Çakmak et al.'s data [33]. Eq. (13) exhibits quantitatively more agreement with the experimental HRR data measured by both the author and other authors [8, 33], compared to other equations (Eq. (8)-(12)). As for qualitative predictive accuracy, Figure 6 and Appendix Figures 2-14 portray the comparison between the calculated HRR values using Eq. (13) and the experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33]. According to these figures, the calculated HRR values from Eq. (13) are also qualitatively well consistent with the experimental HRR data measured by the author, Yeşilyurt and Çakmak, and Çakmak et al. This result is likely due to the fact that the characteristic of Eq. (13) is similar to the variation characteristic of the HRR.

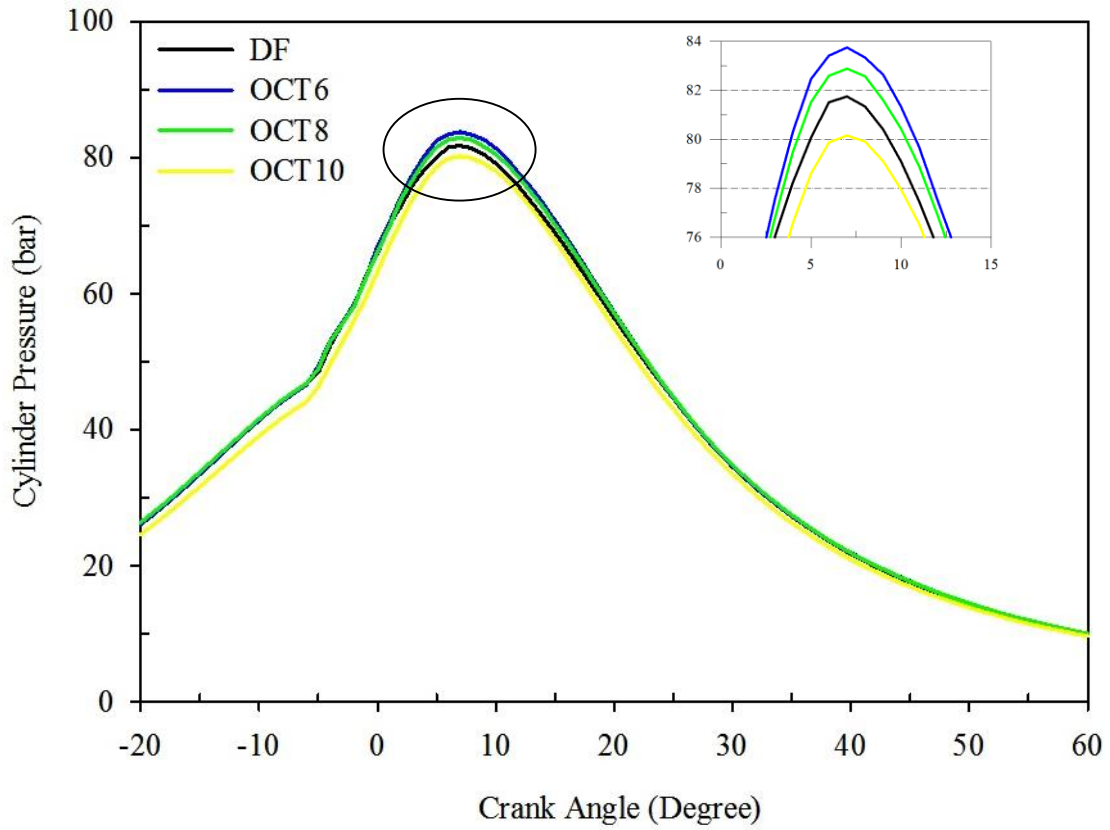


Figure 1. Variation of cylinder pressure depending on crank angle for all fuels

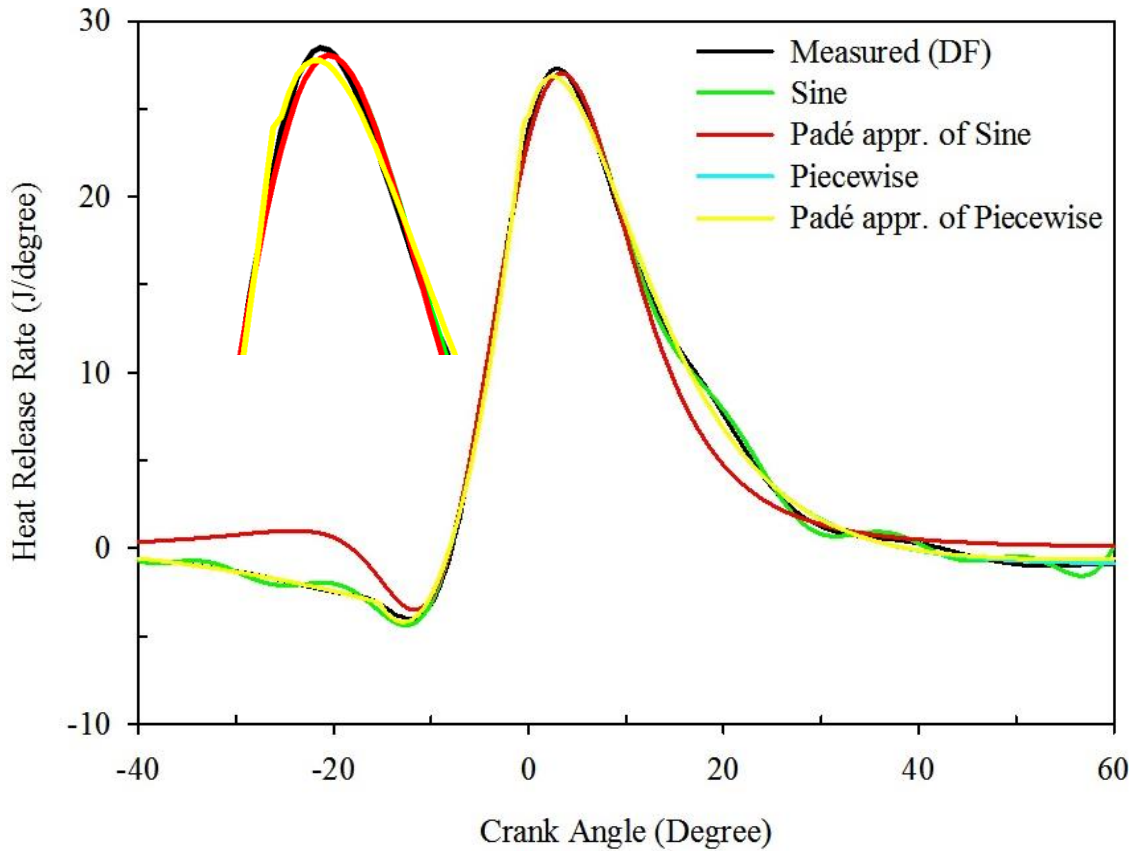


Figure 2. Comparison of measured HRR data of DF and calculated values from the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations and their Padé approximations

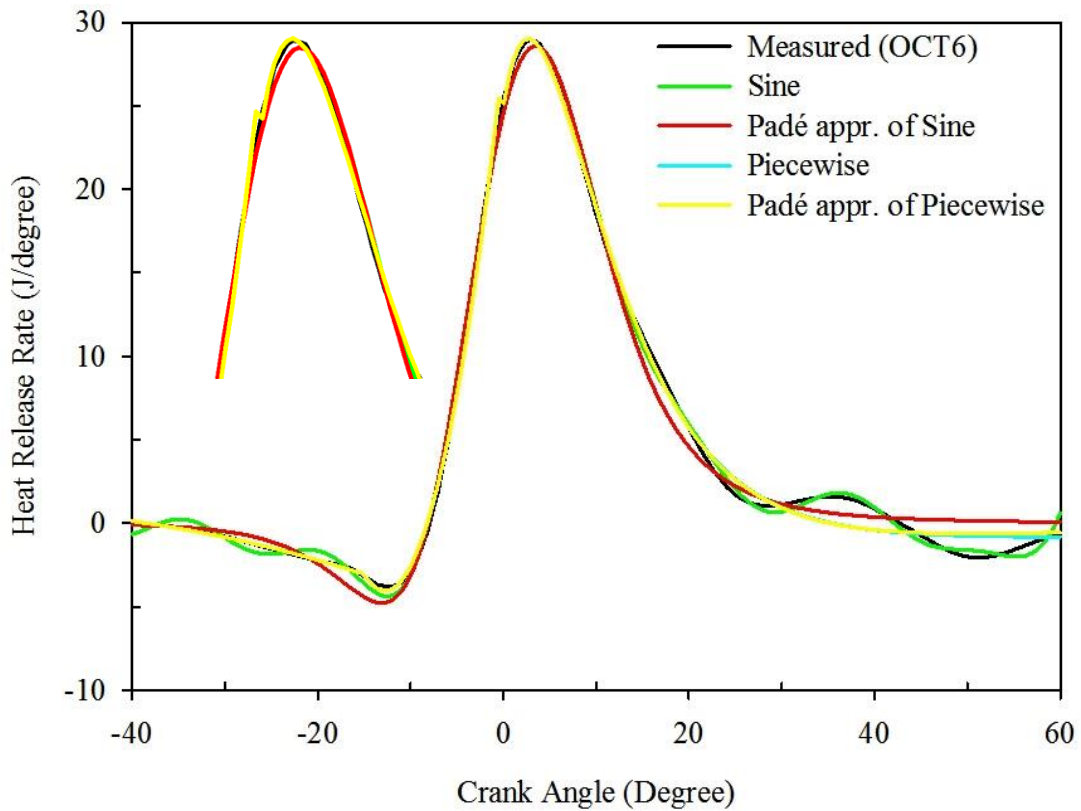


Figure 3. Comparison of measured HRR data of OCT6 and calculated values from the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations and their Padé approximations

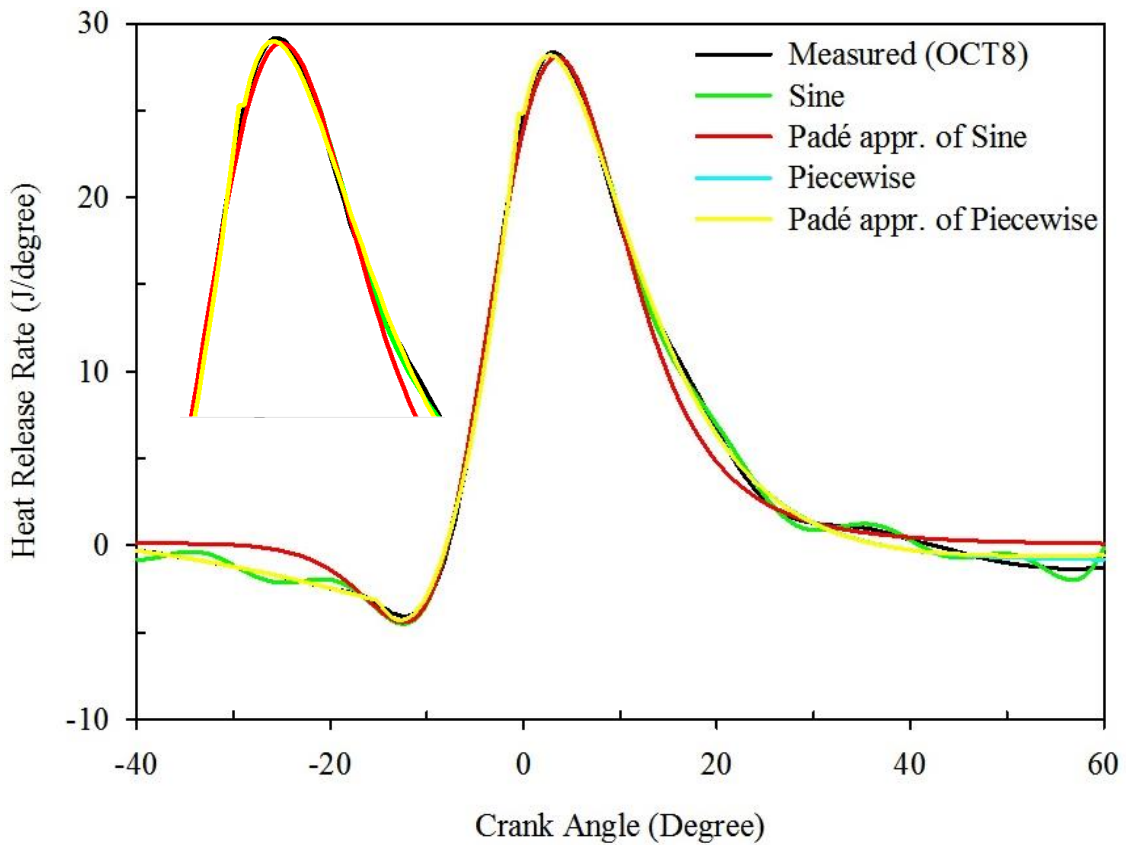


Figure 4. Comparison of measured HRR data of OCT8 and calculated values from the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations and their Padé approximations

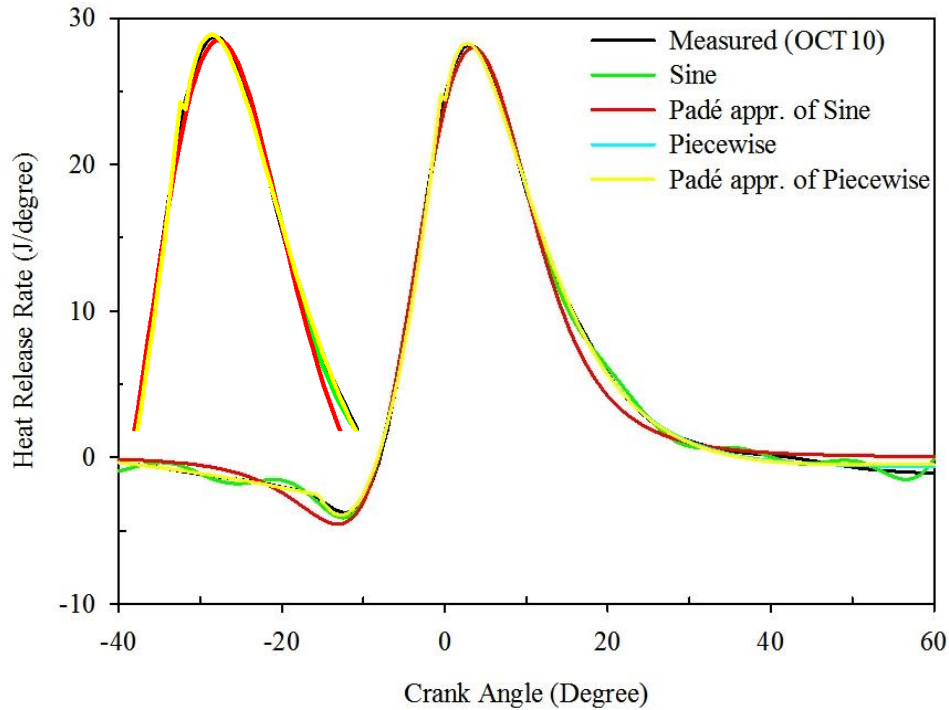


Figure 5. Comparison of measured HRR data of OCT10 and calculated values from the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations and their Padé approximations

Table 2. Regression constants of the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations for the author's data

Fuel	Equation	Regression constants						
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2
DF	Sine (Eq. (8))	11.67	37.93	5.978	2.897	1.568	5.213	0.03855
OCT6		11.92	960.9	7.077	2.707	1.561	5.211	0.001213
OCT8		10.98	7.885	6.379	2.879	1.534	5.499	1.246
OCT10		9.032	10.41	5.63	2.849	1.287	6.369	2.143
DF	Piecewise (Eq. (9))	10.45762	25.47713	-	-	-	2.29846	5.78886
OCT6		10.86057	25.84369	-	-	-	2.38726	7.73898
OCT8		10.67781	25.58212	-	-	-	2.38618	6.93811
OCT10		11.26198	24.87711	-	-	-	2.36364	7.58063

Table 2. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants						
		b_3	b_4	b_5	c_1	c_2	c_3	c_4
DF	Sine (Eq. (8))	10.39	15.44	20.52	0.8966	0.1672	0.7394	1.031
OCT6		10.47	15.56	20.32	0.9511	0.00672	0.7682	0.8721
OCT8		10.53	15.61	20.68	0.8905	1.245	0.7464	0.9233
OCT10		10.98	15.92	20.77	0.8569	1.23	0.7839	0.8928
DF	Piecewise (Eq. (9))	-	-	-	0.09231	0.14523	-	-
OCT6		-	-	-	0.09727	0.16550	-	-
OCT8		-	-	-	0.09726	0.15638	-	-
OCT10		-	-	-	0.09495	0.16650	-	-

Table 2. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants				
		c_5	d_1	d_2	e	f
DF	Sine (Eq. (8))	1.048	-	-	-	-
OCT6		1.134	-	-	-	-
OCT8		1.084	-	-	-	-
OCT10		1.068	-	-	-	-
DF	Piecewise (Eq. (9))	-	-15.33455	-0.92116	0.09400	2.49308
OCT6		-	-15.00712	-0.86288	0.09934	2.62792
OCT8		-	-15.07171	-0.85542	0.09884	2.58905
OCT10		-	-15.46649	-0.64289	0.09603	2.51447

Table 3. The r^2 , relative error, and mean absolute error values coming from Eq. (8) and Eq. (9), and their Padé approximations for the author's data

Fuel	Equation	r^2	Relative error (%)	Mean absolute error
DF	Sine (Eq. (8))	0.9984	1.0772	0.2984
OCT6		0.9979	1.2612	0.3609
OCT8		0.9982	0.9343	0.3346
OCT10		0.9985	0.6797	0.2973
Average		0.9983	0.9881	0.3228
DF	Padé approximation of Sine (Eq. (8))	0.9699	1.0773	1.1710
OCT6		0.9898	1.2612	0.7088
OCT8		0.9883	0.9346	0.7614
OCT10		0.9929	0.6797	0.5828
Average		0.9852	0.9882	0.8060
DF	Piecewise (Eq. (9))	0.9982	1.7809	0.2651
OCT6		0.9950	0.2501	0.4401
OCT8		0.9981	0.5354	0.2962
OCT10		0.9990	0.3888	0.1938
Average		0.9976	0.7388	0.2988
DF	Padé approximation of Piecewise (Eq. (9))	0.9981	1.7807	0.2839
OCT6		0.9946	0.2502	0.4621
OCT8		0.9978	0.5353	0.3153
OCT10		0.9989	0.3888	0.2106
Average		0.9974	0.7388	0.3180

Table 4. Regression constants of the piecewise (Eq. (10)) equation for the author's data

Fuel	Equation	Regression constants					
		a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2
DF	Piecewise (Eq. (10))	10.45762	16.40062	2.29846	-0.60450	0.09231	0.19770
OCT6		10.86057	9.85106	2.38726	-0.55465	0.09727	0.57381
OCT8		10.67781	15.03272	2.38618	-0.60274	0.09726	0.53061
OCT10		11.26198	16.97065	2.36364	-0.67669	0.09495	0.39183

Table 4. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants					
		d_1	d_2	e_1	e_2	f_1	f_2
DF	Piecewise (Eq. (10))	-15.33455	18.61222	0.09400	0.32554	2.49308	28.49428
OCT6		-15.00712	22.24746	0.09934	0.16712	2.62792	53.35073
OCT8		-15.07171	23.63617	0.09884	0.05732	2.58905	51.65241
OCT10		-15.46649	19.94766	0.09603	0.21111	2.51447	28.61170

Table 5. Regression constants of the piecewise (Eq. (11)) equation for the author's data

Fuel	Equation	Regression constants					
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
DF	Piecewise (Eq. (11))	38.22	40.15	12.47	9.189	-0.06939	16.40062
OCT6		26.71	1526	1503	1.212	-0.1556	9.85106
OCT8		20.28	371.8	354.8	1.185	-0.05414	15.03272
OCT10		18.77	525.7	509.4	0.7225	-0.1826	16.97065

Table 5. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants					
		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
DF	Piecewise (Eq. (11))	11.55	12.39	17	18.65	67.72	-0.60450
OCT6		13.23	16.52	16.57	25.5	47.97	-0.55465
OCT8		12.35	16.14	16.32	23.39	69.13	-0.60274
OCT10		12.56	16.43	16.54	26.55	48.15	-0.67669

Table 5. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants					
		c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
DF	Piecewise (Eq. (11))	3.755	1.118	1.432	-6.87	5.113	0.19770
OCT6		3.92	2.292	-0.8264	-6.462	-1.422	0.57381
OCT8		3.608	2.221	-0.8382	-7.11	5.342	0.53061
OCT10		3.674	2.303	-0.7859	-6.048	-1.405	0.39183

Table 5. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants		
		d	e	f
DF		18.61222	0.32554	28.49428
OCT6	Piecewise (Eq. (11))	22.24746	0.16712	53.35073
OCT8		23.63617	0.05732	51.65241
OCT10		19.94766	0.21111	28.61170

Table 6. Regression constants of the piecewise (Eq. (12)) equation for the author's data

Fuel	Equation	Regression constants					
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
DF		38.22	40.15	12.47	9.189	-0.06939	25.47713
OCT6	Piecewise (Eq. (12))	26.71	1526	1503	1.212	-0.1556	25.84369
OCT8		20.28	371.8	354.8	1.185	-0.05414	25.58212
OCT10		18.77	525.7	509.4	0.7225	-0.1826	24.87711

Table 6. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants					
		b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆
DF		11.55	12.39	17	18.65	67.72	5.78886
OCT6	Piecewise (Eq. (12))	13.23	16.52	16.57	25.5	47.97	7.73898
OCT8		12.35	16.14	16.32	23.39	69.13	6.93811
OCT10		12.56	16.43	16.54	26.55	48.15	7.58063

Table 6. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants				
		c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
DF		3.755	1.118	1.432	-6.87	5.113
OCT6	Piecewise (Eq. (12))	3.92	2.292	-0.8264	-6.462	-1.422
OCT8		3.608	2.221	-0.8382	-7.11	5.342
OCT10		3.674	2.303	-0.7859	-6.048	-1.405

Table 6. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants	
		c ₆	d
DF		0.14523	-0.92116
OCT6	Piecewise (Eq. (12))	0.16550	-0.86288
OCT8		0.15638	-0.85542
OCT10		0.16650	-0.64289

Table 7. The r², relative error, and mean absolute error values coming from Eqs. (10)-(12) for the author's data

Fuel	Equation	r ²	Relative error (%)	Mean absolute error
DF		0.9931	7.2153	0.3598
OCT6	Piecewise (Eq. (10))	0.9903	8.6836	0.5023
OCT8		0.9918	7.5255	0.3747
OCT10		0.9912	9.2117	0.3661
Average		0.9916	8.1590	0.4007
DF		0.9930	7.2153	0.4093
OCT6	Piecewise (Eq. (11))	0.9879	8.6836	0.6771
OCT8		0.9919	7.5255	0.3937
OCT10		0.9867	9.2117	0.6302
Average		0.9899	8.1590	0.5276
DF		0.9981	1.7809	0.3147
OCT6	Piecewise (Eq. (12))	0.9927	0.2501	0.6149
OCT8		0.9981	0.5354	0.3152
OCT10		0.9945	0.3888	0.4579
Average		0.9959	0.7388	0.4257

Table 8. Regression constants of Eq. (13) for the author's data

Fuel	Equation	Regression constants					
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	b ₁	b ₂
DF		-70.64	-1399	1.318e5	1.09e6	-14.51	646.6
OCT6	Eq. (13)	-77.76	-694.3	1.057e5	8.519e5	-3.003	433.8
OCT8		-73.85	-1048	1.202e5	9.665e5	-8.067	536.2
OCT10		-51.73	-785	8.645e4	7.162e5	-6.25	381.4

Table 8. (Continued)

Fuel	Equation	Regression constants	
		b_3	b_4
DF	Eq. (13)	1456	4.472e4
OCT6		965.8	3.339e4
OCT8		1094	3.87e4
OCT10		785	2.879e4

Table 9. The r^2 , relative error, and mean absolute error values coming from Eq. (13) for the author's data

Fuel	Equation	r^2	Relative error (%)	Mean absolute error
DF	Eq. (13)	0.9984	1.2667	0.2822
OCT6		0.9955	0.2562	0.4403
OCT8		0.9983	0.5027	0.3195
OCT10		0.9990	0.4377	0.2292
Average		0.9978	0.6158	0.3178

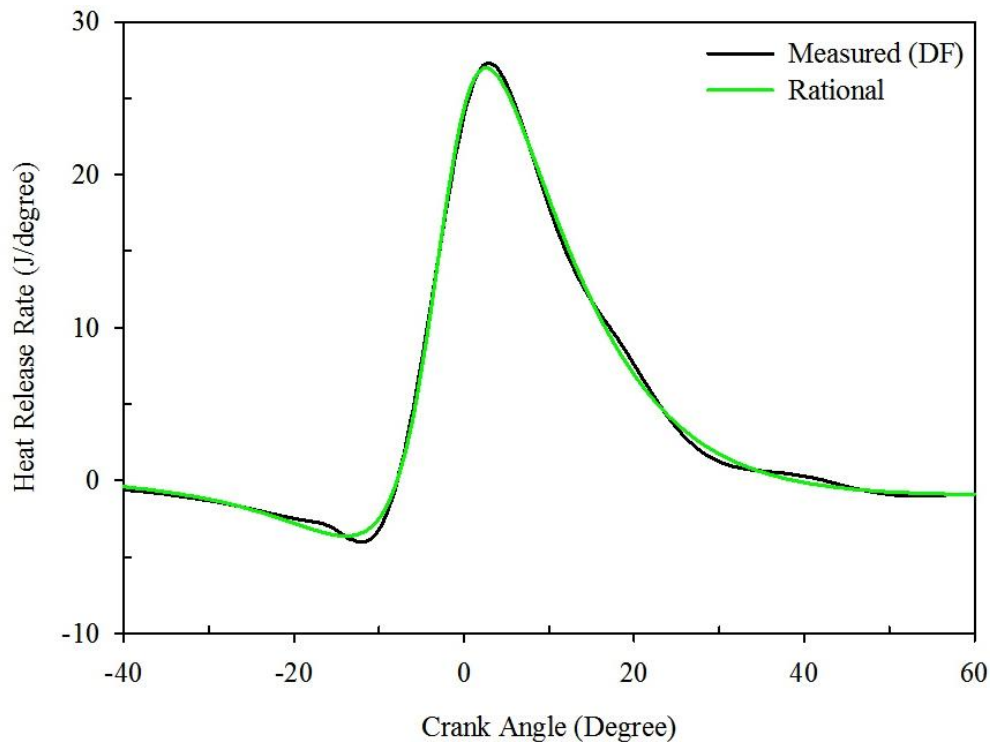


Figure 6. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of DF measured by the author

Table 10 summarizes the regression results of the investigated equations for all the experimental datasets. In Table 10, the "well" term indicates that the corresponding equation gives both an average relative error of less than 5% and an average r^2 of closer to 1.00 for the corresponding data set (i.e. well prediction accuracy), while the "poor" term indicates the opposite (i.e. poor prediction accuracy).

Table 10. Summary of regression results

Equation	Measured HRR data		
	The author	Yeşilyurt and Çakmak [8]	Çakmak et al. [33]
Eq. (8)	Well	Poor	Poor
Eq. (9)	Well	Poor	Well
Eq. (10)	Poor	Poor	Well
Eq. (11)	Poor	Poor	Well
Eq. (12)	Well	Poor	Well
Eq. (13)	Well	Well	Well

4 Conclusions

In recent years, n-octanol has emerged as a promising biofuel option, exhibiting considerable potential as an alternative to diesel fuel owing to its favourable fuel properties. Therefore, experimental studies have been performed to examine the effects of n-octanol blends on the performance, exhaust emissions, and combustion characteristics of diesel engines. On the other hand, there are a limited number of studies on the use of the function approximation methods for predicting combustion parameters. To eliminate this gap in the existing literature, this study focuses on the use of regression equations and their Padé approximations to predict the HRR of a single-cylinder diesel engine fuelled with DF and n-octanol blends (OCT6, OCT8, and OCT10). The predictive capabilities of suggested regression equations and their Padé approximations are also

tested against the literature data measured by different authors. The main conclusions are as follows:

Compared with DF, the ignition delay and peak heat release rate show an increase of 3.8462% and 5.9501% for OCT6, 7.6923% and 3.7125% for OCT8, and 8.9744% and 3.0755% for OCT10, respectively.

Compared to DF, the peak cylinder pressure of OCT6 and OCT8 is observed to be higher by 2.4378% and 1.3982%, while that of OCT10 is found to be lower by 1.9458%.

The sine equation (Eq. (8)), the piecewise equation (Eq. (9)), and the Padé approximation of the piecewise equation (Eq. (9)) demonstrate superior quantitative performance in terms of higher average r^2 (0.9983, 0.9976, 0.9974), lower average relative error (0.9881%, 0.7388%, 0.7388%), and lower average mean absolute error values (0.3228, 0.2988, 0.3180), respectively, for the author's HRR data.

The sine equation (Eq. (8)), Padé approximation of the sine equation, the piecewise equation (Eq. (9)), and Padé approximation of the piecewise equation (Eq. (9)) yield relatively high average relative errors (22.8316%, 22.7955%, 6.7514%, 6.7515%; and 16.4322%, 16.4303%, 4.4275%, 4.4274%) and low average r^2 (0.9357, 0.3341, 0.9512, 0.9503; and 0.9522, 0.0937, 0.9793, 0.9792) values for the prediction of the HRR data measured by Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33].

None of the other piecewise equations (Eqs. (10-12)) show a correlation with quantitatively sufficient accuracy for all experimental HRR data obtained by the author, Yeşilyurt and Çakmak [8], and Çakmak et al. [33]. Eq. (10), Eq. (11), and Eq. (12) exhibit relatively low average r^2 (0.9916, 0.9899, 0.9959 for the author's data; 0.9583, 0.9900, 0.9829 for Yeşilyurt and Çakmak's data; 0.9853, 0.9887, 0.9828 for Çakmak et al.'s data) and high average relative error (8.1590%, 8.1590%, 0.7388% for the author's data; 6.7514%, 5.5069%, 5.5069% for Yeşilyurt and Çakmak's data; 4.4275%, 2.7285%, 2.7285% for Çakmak et al.'s data) values when used for predicting HRR data.

Eq. (13) qualitatively and quantitatively exhibits better curve fitting with all experimental HRR data measured by the author and different authors compared to other equations.

This study can contribute to the literature by suggesting Eq. (13) as a useful tool to predict the heat release rate of a diesel engine fuelled with diesel fuel and n-octanol blends for internal combustion engine studies. In other words, given the technical and economic difficulties involved in determining the heat release rate, Eq. (13) appears to be one of the most favorable choices, particularly for numerical internal combustion engine studies.

For deriving general correlations depending on fuel properties, engine speed, engine load, injection timing, compression ratio, etc., more cylinder pressure data can be measured. Then, multiple regression models with independent variables can be used. Moreover, some machine learning methods can be used to generalize the regression constants. In addition, other function approximation methods can be investigated for predicting HRR.

As a future study, machine learning methods can be chosen for classification or prediction problems related to engine studies.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 18%

References

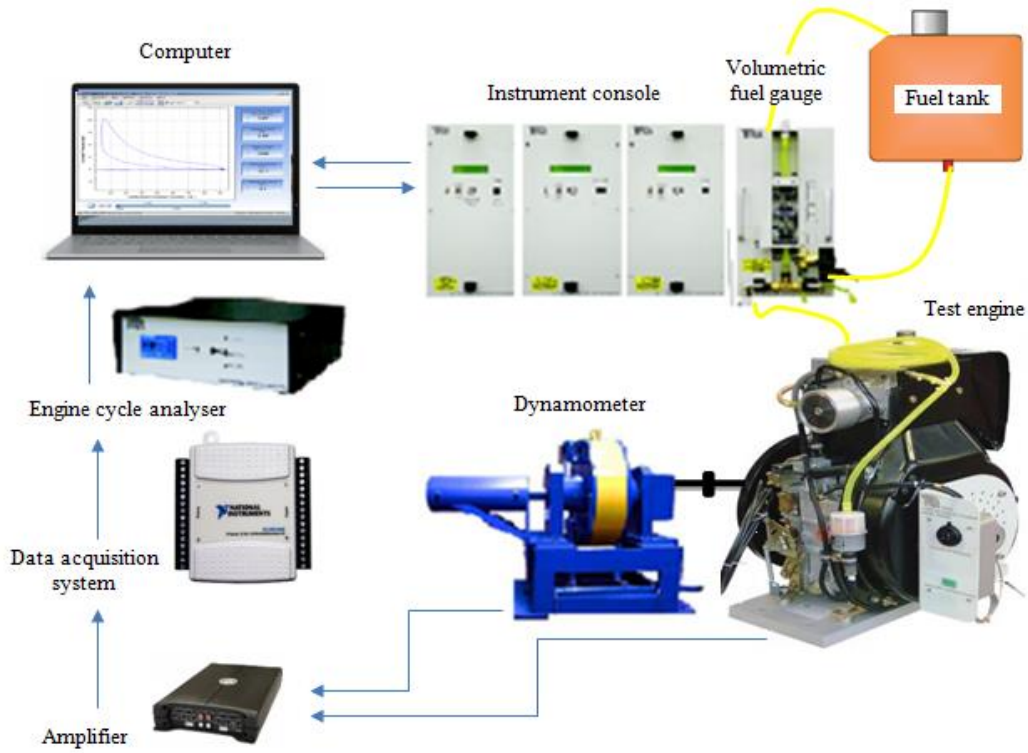
- [1] T. Sathish, Ü. Ağbulut, S. M. George, K. Ramesh, R. Saravanan, K. L. Roberts, P. Sharma, M. Asif and A. T. Hoang, Waste to fuel: Synergetic effect of hybrid nanoparticle usage for the improvement of CI engine characteristics fuelled with waste fish oils. *Energy*, 275, 127397, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127397>.
- [2] S. Beccari, E. Pipitone and S. Caltabellotta, Analysis of the combustion process in a hydrogen-fueled CFR engine. *Energies*, 16(5), 1-14, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16052351>.
- [3] M. K. Yesilyurt and C. Cesur, A statistical optimization attempt by applying the Taguchi technique for the optimum transesterification process parameters in the production of biodiesel from *Papaver somniferum* L. seed oil. *Fuel*, 329, 125406, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125406>.
- [4] H. Sanli, E. Alptekin and M. Canakci, Using low viscosity micro-emulsification fuels composed of waste frying oil-diesel fuel-higher bio-alcohols in a turbocharged-CRDI diesel engine. *Fuel*, 308, 121966, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121966>.
- [5] K. Seenianappan, B. Venkatesan, N. N. Krishnan, T. Kandhasamy, S. Arunachalam, R. K. Seeta and M. V. Depoures, A comparative assessment of performance and emission characteristics of a DI diesel engine fuelled with ternary blends of two higher alcohols with lemongrass oil biodiesel and diesel fuel. *Energy & Environment*, 33(6), 1134-1159, 2022. <https://doi.org/10.1177/0958305x211051323>.
- [6] M. V. D. Poures, A. P. Sathiyagnanam, D. Rana, R. K. Babu, S. Subramani, B. Sethuramasamyraja and D. Damodharan, Using renewable n-octanol in a non-road diesel engine with some modifications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(10), 1194-1208, 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1544997>.
- [7] B. R. Kumar, S. Saravanan, D. Rana, V. Anish and A. Nagendran, Effect of a sustainable biofuel-n-octanol-on the combustion, performance and emissions of a DI diesel engine under naturally aspirated and exhaust gas recirculation (EGR) modes. *Energy Conversion and Management*, 118, 275-286, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.001>.
- [8] M. K. Yesilyurt and A. Çakmak, An extensive investigation of utilization of a C8 type long-chain alcohol as a sustainable next-generation biofuel and diesel fuel blends in a CI engine-The effects of alcohol infusion ratio on the performance, exhaust emissions, and combustion characteristics. *Fuel*, 305, 121453, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121453>.
- [9] K. Gopal, A. P. Sathiyagnanam, B. R. Kumar, S. Saravanan, D. Rana and B. Sethuramasamyraja, Prediction of emissions and performance of a diesel

- engine fueled with n-octanol/diesel blends using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 184, 423-439, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.204>.
- [10] M. K. Akhtar, H. Dandapani, K. Thiel and P. R. Jones, Microbial production of 1-octanol: A naturally excreted biofuel with diesel-like properties. *Metabolic Engineering Communications*, 2, 1-5, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.meten.2014.11.001>.
- [11] Sidharth and N. Kumar, Performance and emission studies of ternary fuel blends of diesel, biodiesel and octanol. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(18), 2277-2296, 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607940>.
- [12] B. Ashok, K. Nanthagopal, V. Anand, K. M. Aravind, A. K. Jeevanantham and S. Balusamy, Effects of n-octanol as a fuel blend with biodiesel on diesel engine characteristics. *Fuel*, 235, 363-373, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.126>.
- [13] M. S. C. Sekar, V. R. Ananthan, N. Baskaran, H. K. S. Kumar and R. Arumugam, Combustion, performance, and emission study on the octanol-neem biodiesel blends fueled diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1741736>.
- [14] S. Ali, M. V. D. Poures, D. Damodharan, K. Gopal, V. C. Augustin and M. R. Swaminathan, Prediction of emissions and performance of a diesel engine fueled with waste cooking oil and C8 oxygenate blends using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133323, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133323>.
- [15] L. Konjević, M. Racar, P. Ilinčić and F. Faraguna, A comprehensive study on application properties of diesel blends with propanol, butanol, isobutanol, pentanol, hexanol, octanol and dodecanol. *Energy*, 262, 125430, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125430>.
- [16] J. Li, Y. Liang and W. Yang, Combustion characteristics and emissions formation of a compression ignition engine fueled with C8 biofuels blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(3), 5991-6008, 2022. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2095062>.
- [17] A. Mahalingam, Y. Devarajan, S. Radhakrishnan, S. Vellaiyan and B. Nagappan, Emissions analysis on mahua oil biodiesel and higher alcohol blends in diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 2627-2631, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.07.009>.
- [18] D. Damodharan, K. Gopal, A. P. Sathiyagnanam, B. R. Kumar, M. V. Depoures and N. Mukilarasan, Performance and emission study of a single cylinder diesel engine fuelled with n-octanol/WPO with some modifications. *International Journal of Ambient Energy*, 42(7), 779-788, 2019. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1563824>.
- [19] N. Joy, Y. Devarajan, B. Nagappan and A. Anderson, Exhaust emission study on neat biodiesel and alcohol blends fueled diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(1), 115-119, 2018. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1405119>.
- [20] A. Bilgin and M. Gulüm, Effects of various transesterification parameters on the some fuel properties of hazelnut oil methyl ester. *Energy Procedia*, 147, 54-62, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.033>.
- [21] M. K. Yesilyurt, A detailed investigation on the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a diesel engine running on the blend of diesel fuel, biodiesel and 1-heptanol (C7 alcohol) as a next-generation higher alcohol. *Fuel*, 275, 117893, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117893>.
- [22] M. A. Ghadikolaei, P. K. Wong, C. S. Cheung, Z. Ning, K. F. Yung, J. Zhao, N. K. Gali and A. V. Berenjestanaki, Impact of lower and higher alcohols on the physicochemical properties of particulate matter from diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110970, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110970>.
- [23] A. I. El-Seesy, M. S. Waly, Z. He, H. M. El-Batsh, A. Nasser and R. M. El-Zoheiry, Influence of quaternary combinations of biodiesel/methanol/n-octanol/diethyl ether from waste cooking oil on combustion, emission, and stability aspects of a diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 240, 114268, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114268>.
- [24] European Parliament Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0030&from=en>, Accessed 28 June 2023.
- [25] European Parliament Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0557>, Accessed 28 June 2023.
- [26] M. Gülüm, Performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel fuel + corn oil + alcohol ternary blends. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 53767-53777, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26053-x>
- [27] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw Hill Series in mechanical engineering, 1988. ISBN: 0-07-100499-8.
- [28] M. Bakioğlu, *Sayısal Analiz (in Turkish)*. Birsen Yayınevi, 2011. ISBN: 978-975-511-353-3.
- [29] C.F. Gerald and P.O. Wheatley, *Applied Numerical Analysis (Seventh Edition)*. Pearson Education, 2004. ISBN: 0-321-13304-8.
- [30] L.V. Fausett, *Numerical Methods Using MathCAD*. Prentice-Hall, 2002. ISBN: 0-13-061081-X.

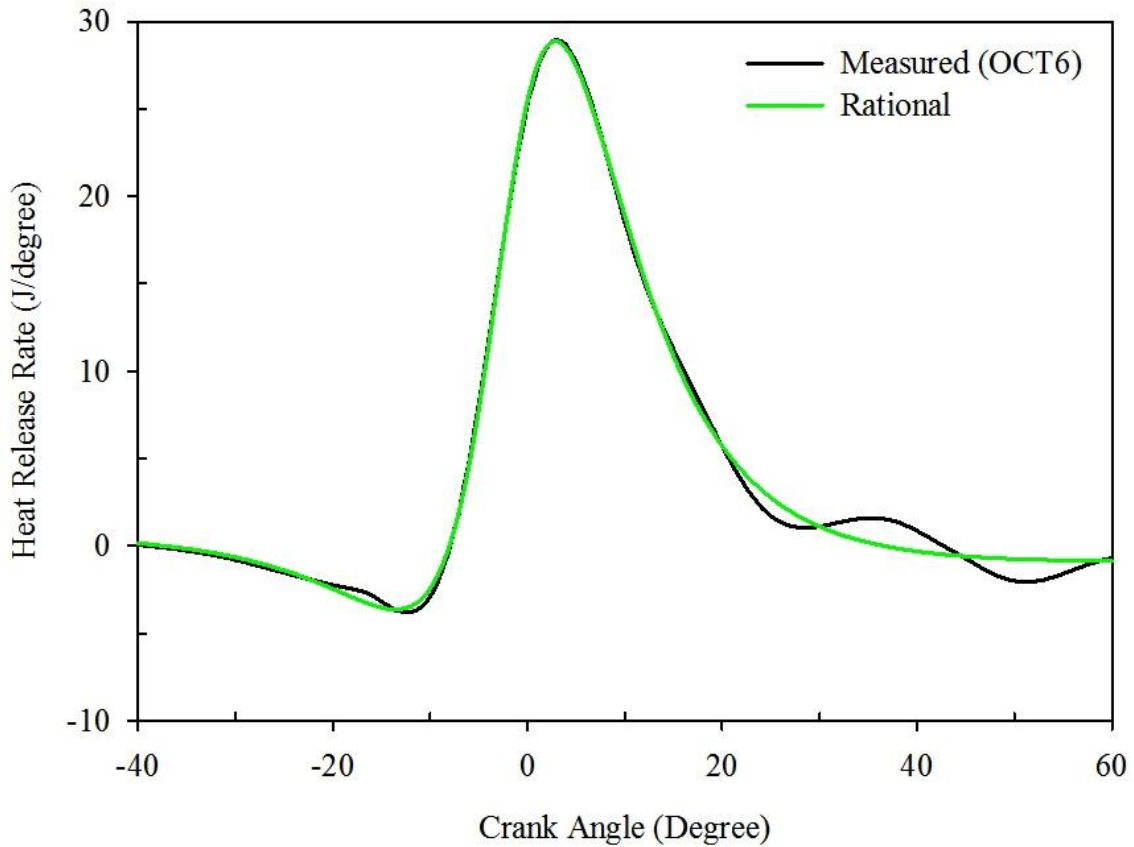
- [31] MATLAB Curve Fitting Toolbox User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020.
- [32] J.L. Hintze, NCSS User's Guide III Regression and Curve Fitting. NCSS Statistical System, 2007, <https://www.ncss.com/download/ncss/manuals/>, Accessed: 31.05.2023.
- [33] A. Çakmak, M. K. Yeşilyurt, D. Erol and B. Doğan, The experimental investigation on the impact of n-octanol in the compression-ignition engine operating with biodiesel/diesel fuel blends: exergy, exergoeconomic, environmental analyses. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147, 11231-11259, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11357-w>.



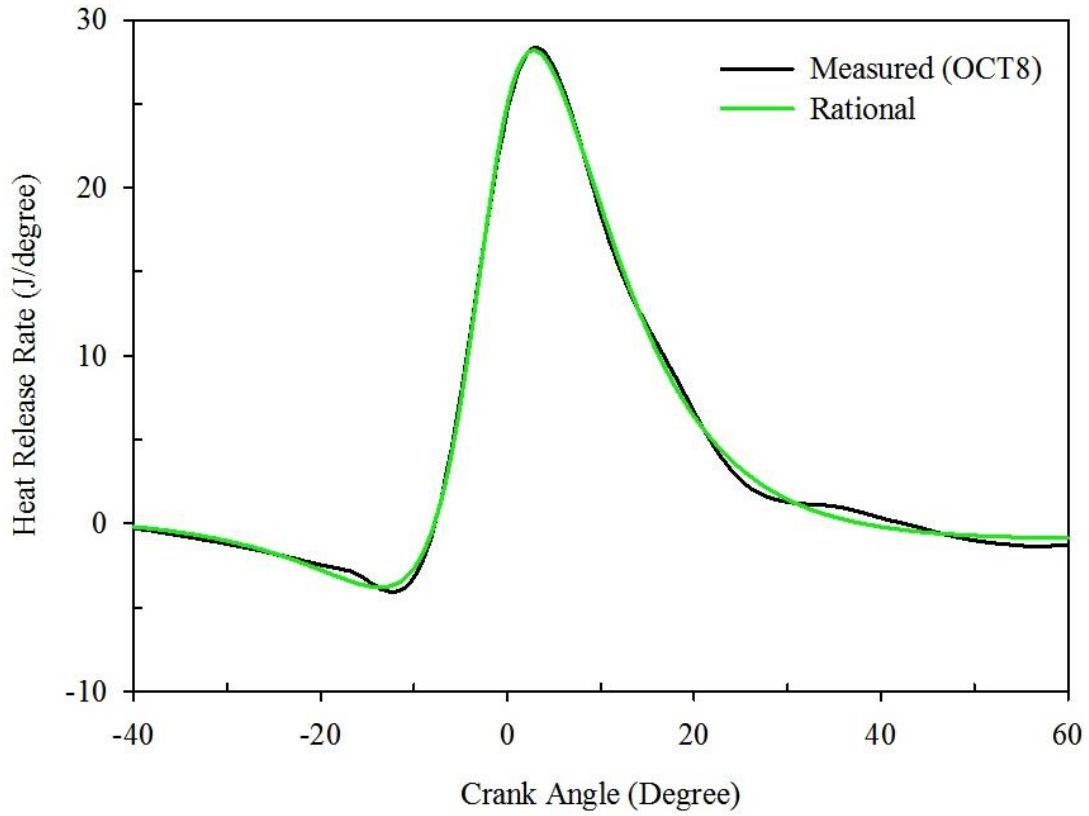
Appendix



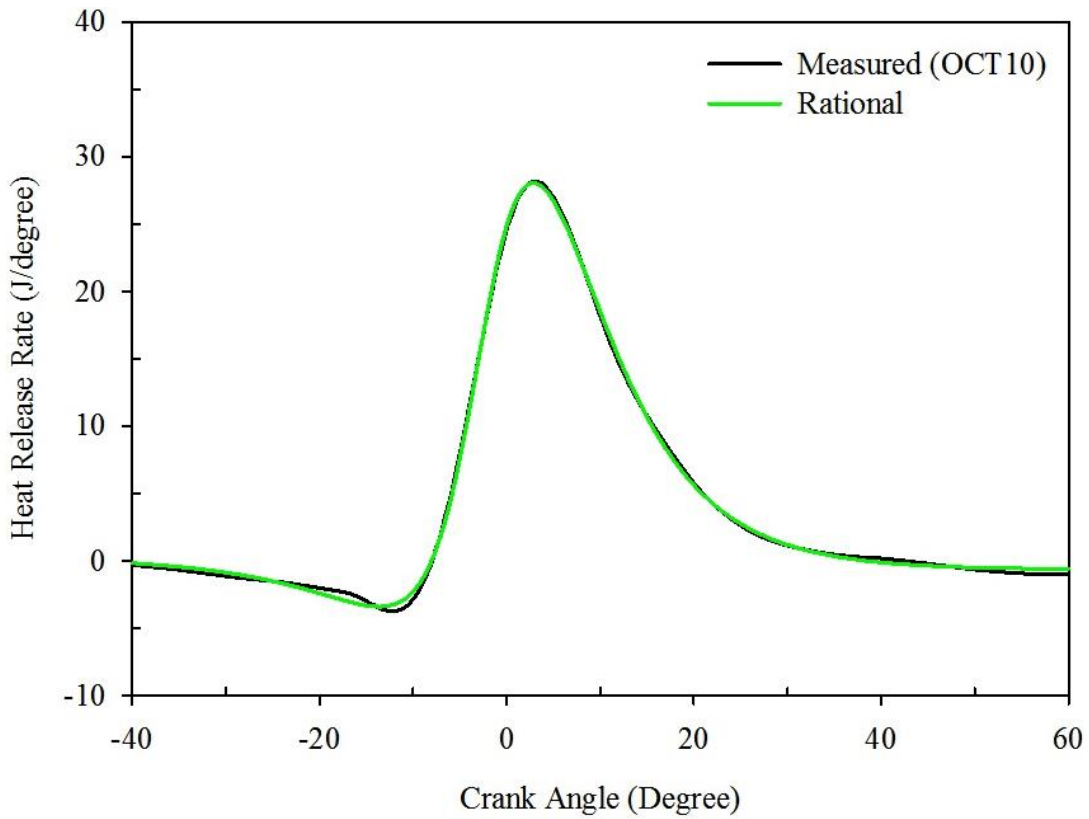
Appendix Figure 1. Schematic figure of the experimental setup



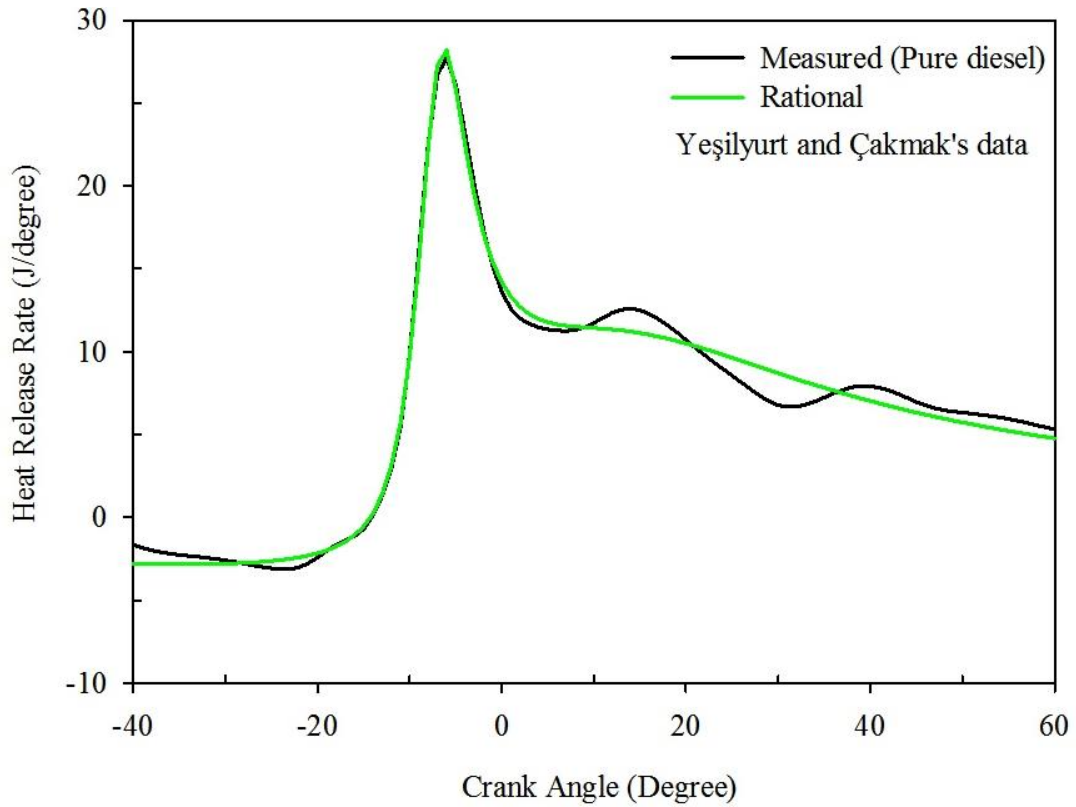
Appendix Figure 2. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of OCT6 measured by the author



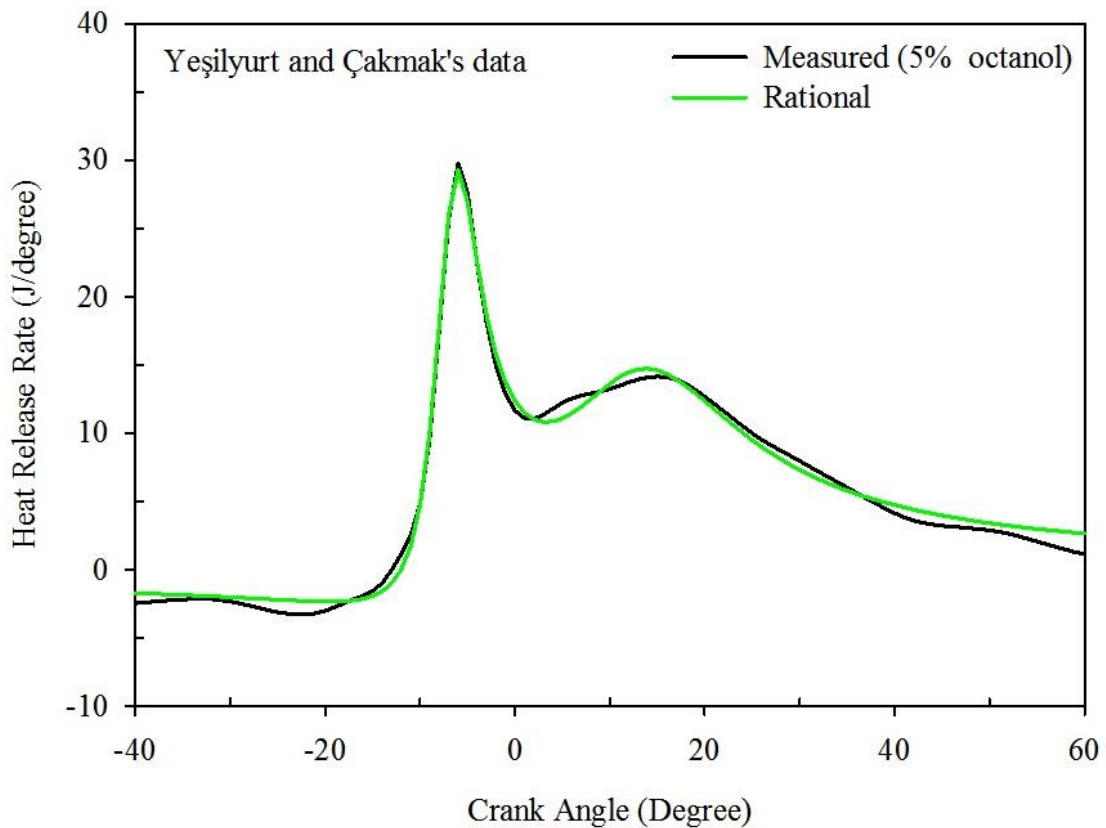
Appendix Figure 3. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of OCT8 measured by the author



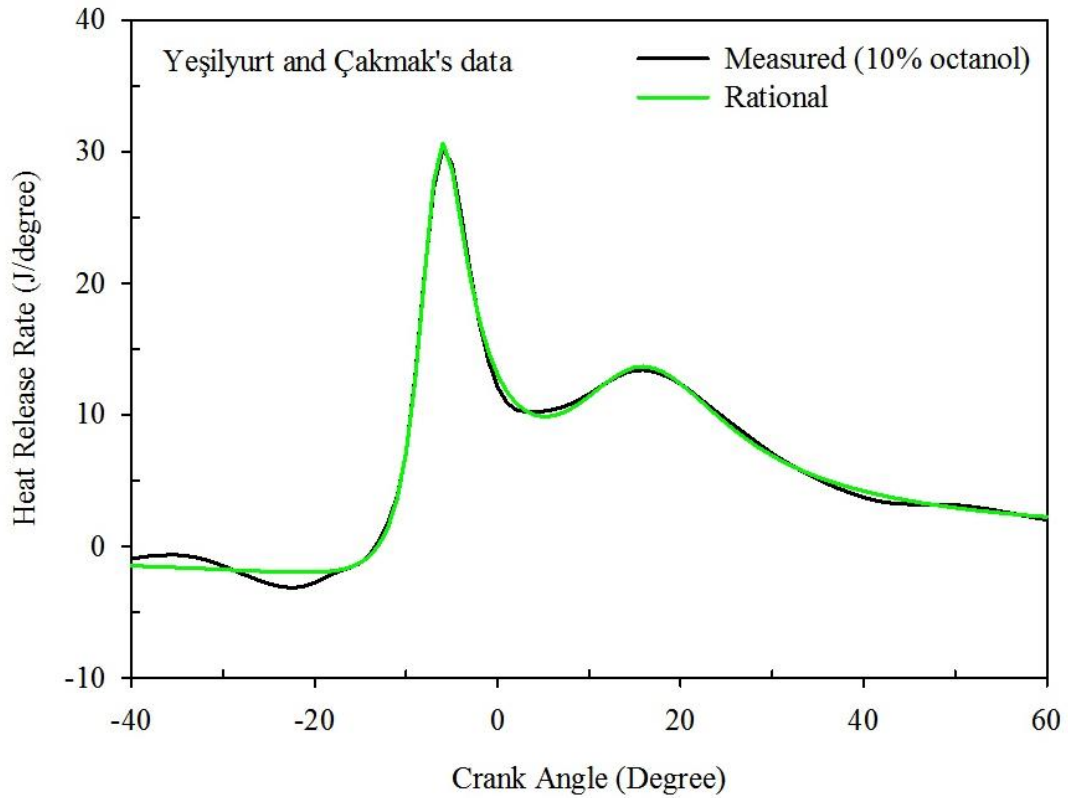
Appendix Figure 4. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of OCT10 measured by the author



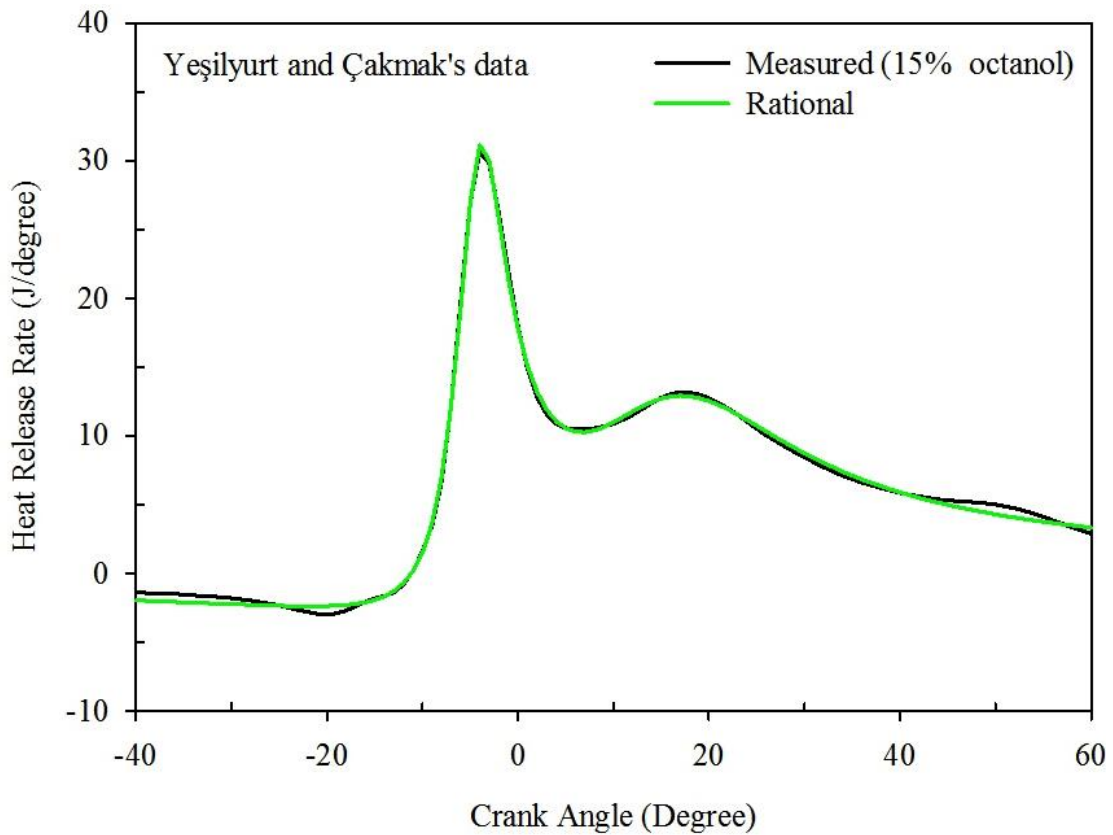
Appendix Figure 5. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of pure diesel measured by Yeşilyurt and Çakmak [8]



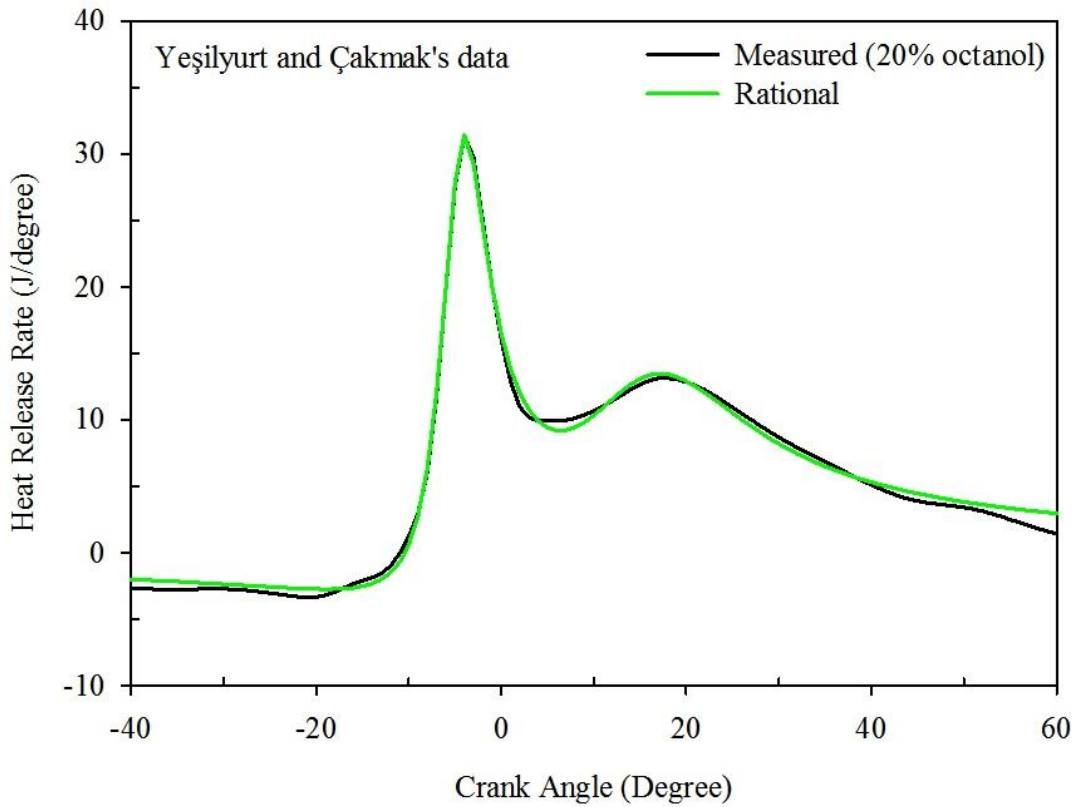
Appendix Figure 6. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 5% octanol) measured by Yeşilyurt and Çakmak [8]



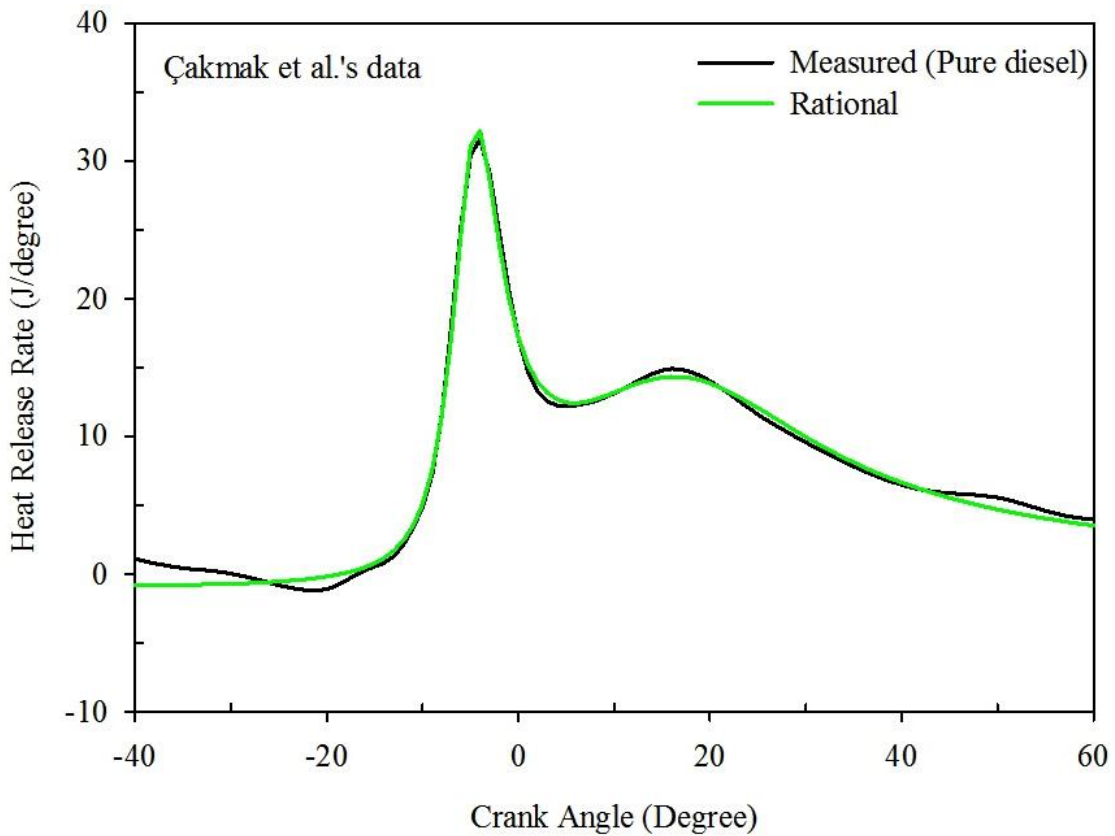
Appendix Figure 7. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 10% octanol) measured by Yeşilyurt and Çakmak [8]



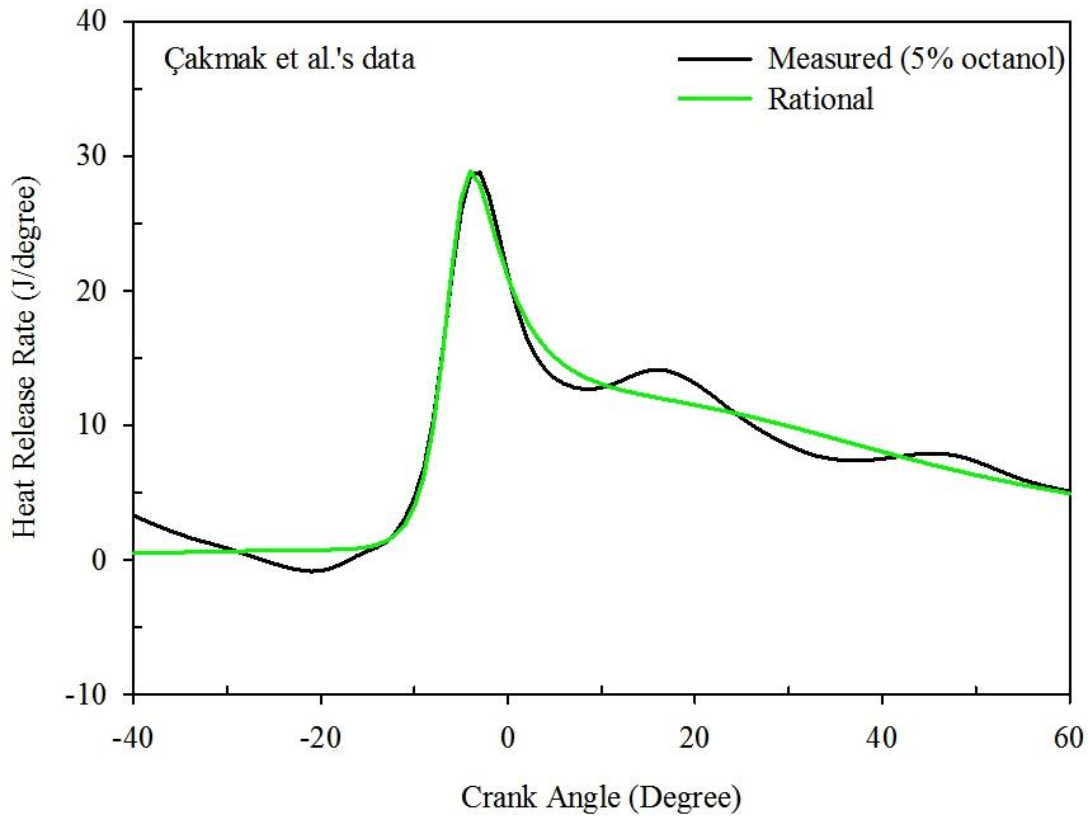
Appendix Figure 8. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 15% octanol) measured by Yeşilyurt and Çakmak [8]



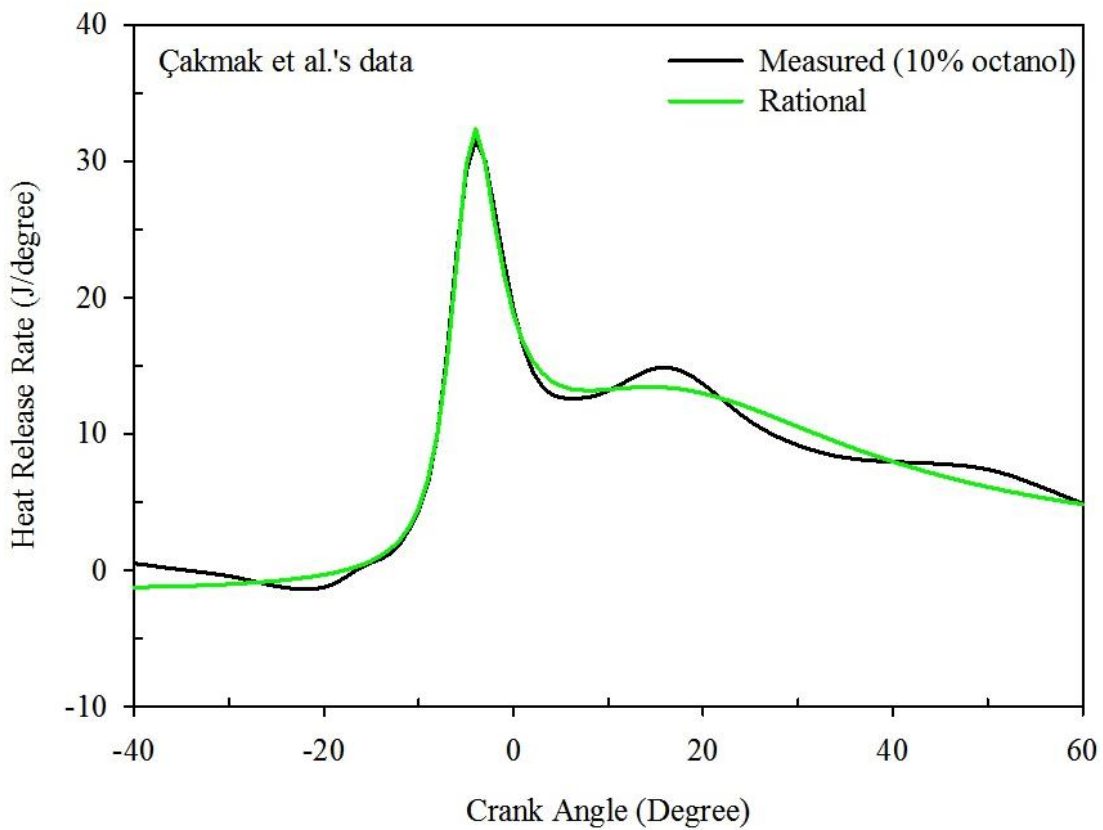
Appendix Figure 9. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 20% octanol) measured by Yeşilyurt and Çakmak [8]



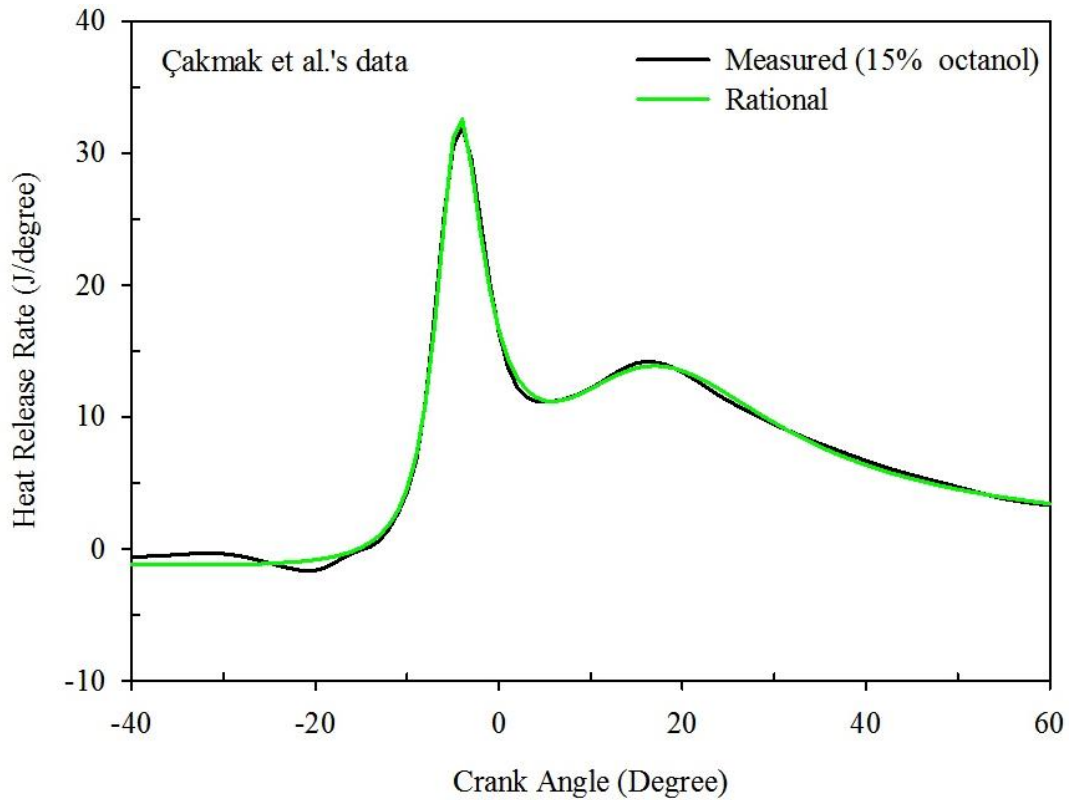
Appendix Figure 10. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of pure diesel measured by Çakmak et al. [33]



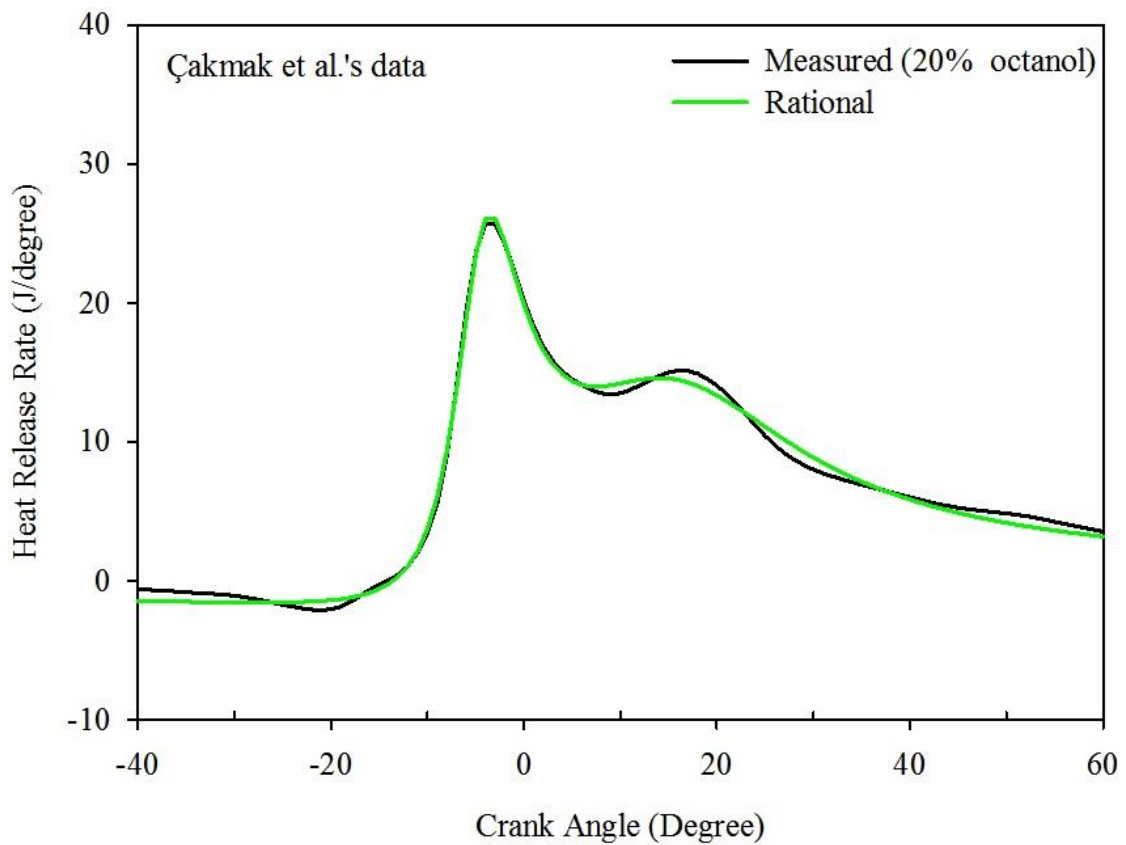
Appendix Figure 11. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 5% octanol) measured by Çakmak et al. [33]



Appendix Figure 12. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 10% octanol) measured by Çakmak et al. [33]



Appendix Figure 13. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 15% octanol) measured by Çakmak et al. [33]



Appendix Figure 14. Comparison of the predicted values (from Eq. (13)) with the experimental HRR data of the blend (including 20% octanol) measured by Çakmak et al. [33]

Appendix Table 1. The main fuel properties of DF

Property*	Test method	Limit		Value	
		Min.	Max.		
Density at 15°C (kg/m ³)	TS EN ISO 12185	820	845	834.8	
Kinematic viscosity at 40°C (mm ² /s)	TS EN ISO 3104	2	4.5	2.714	
Flash point temperature (°C)	TS EN ISO 2719	>55	-	58.5	
Higher heating value (MJ/kg)	DIN 51900-2	-	-	45.225	
Total contaminat. (mg/kg)	TS EN 12662	-	24	16.5	
Cold filter plugging point temperature (°C)	TS EN 116	-	+5 (Sum.) -15 (Win.)	-12	
Copper strip corrosion at 3 h and 50°C	TS 2741 EN ISO 2160	-	1	1A	
Lubrication property (µm)	TS EN ISO 12156-1	-	460	397	
Sulfur (mg/kg)	TS EN ISO 20846	-	10	6.8	
Distillation	TS EN ISO 3405	250°C (% v/v)	-	<65	38.2
		350°C (% v/v)	85	-	93.8
		95% (v/v)	-	360°C	356.1
Cetane index	TS EN ISO 4264	46	-	51.7	
Cetane number**	EN ISO 5165 EN 15195	51	-	51	

*: All properties except cetane number were measured at Prof. Dr. Saadettin GUNER Fuel Application and Research Center.

**: Cetane number is given by the supplier of DF used in this study.

Appendix Table 2. Technical specification of the test engine

Type of engine	Direct-injection and naturally aspirated
Valve	2 (One inlet and one exhaust)
Nozzle hole number/diameter	5/0.162 mm
Nozzle type	Standard
Injector opening pressure	220 bar
Injection pump type	Mechanical
Cooling system	Air
Bore x stroke (mm)	88 x 76
Connecting rod length (mm)	124
Engine capacity (cm ³)	462
Compression ratio	20.5:1
Start of fuel injection	13 crank angle (degree) before the top dead center

Appendix Table 3. Regression constants of the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	Regression constants						
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	b ₁	b ₂
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	4.94	13.17	3.614	2.048	3.243	7.453	2.176
5		3.515	13.94	3.789	2.955	-2.186	7.901	2.443
10		3.721	13.38	4.682	3.409	2.395	7.791	2.38
15		4.193	13.63	4.567	3.524	2.301	7.989	2.35
20		3.594	13.54	4.557	3.524	2.378	8.103	2.463
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	8.22380	6.77598	-	-	-	-3.23415	0.75714
5		3.80474	11.42232	-	-	-	-4.62354	1.83147
10		5.90853	10.02813	-	-	-	-4.46131	1.55554
15		14.28259	19.42027	-	-	-	2.00227	0.59948
20		14.57193	22.04874	-	-	-	1.99629	1.02745

Appendix Table 3. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants						
		b ₃	b ₄	b ₅	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	12.06	22.02	16.85	1.620	1.089	2.825	-2.599
5		12.03	17.12	21.99	1.238	1.067	2.802	3.241
10		12.06	17.03	21.99	1.412	1.133	2.841	3.204
15		12.44	17.67	22.50	1.284	1.026	2.421	2.533
20		12.43	17.71	22.54	1.322	1.000	2.459	2.593
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	-	-	-	-0.33508	0.07427	-	-
5		-	-	-	-0.47497	0.06283	-	-
10		-	-	-	-0.46152	0.06240	-	-
15		-	-	-	0.05609	0.02968	-	-
20		-	-	-	0.05407	0.03233	-	-

Appendix Table 3. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants				
		c_5	d_1	d_2	e	f
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	3.236	-	-	-	-
5		6.733	-	-	-	-
10		3.538	-	-	-	-
15		2.841	-	-	-	-
20		2.908	-	-	-	-
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	-	-11.37961	5.11708	-0.35157	-4.17335
5		-	-10.32028	-1.94341	-0.48798	-5.35529
10		-	-10.55624	-1.12643	-0.47895	-5.37384
15		-	-21.28344	-6.56398	0.06078	2.36784
20		-	-21.51955	-11.27791	0.05772	2.25004

Appendix Table 4. Regression constants of the sine (Eq. (8)) and the piecewise (Eq. (9)) equations for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	Regression constants						
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	4.042	15.1	3.328	4.389	-2.294	7.954	2.2
5		5.062	14.68	4.027	3.096	1.943	7.86	2.085
10		4.721	15.08	4.07	3.386	2.23	7.821	2.141
15		3.897	14.6	4.422	-2.422	3.563	8.022	2.245
20		14.94	3.555	4.68	2.901	1.522	2.287	12.07
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	11.74727	14.24844	-	-	-	-3.55641	1.01905
5		15.77979	15.37784	-	-	-	-1.50551	0.00025
10		13.08163	13.47703	-	-	-	-3.75826	0.51029
15		10.38882	17.89887	-	-	-	-3.80176	0.96558
20		13.76048	16.92187	-	-	-	-1.40068	0.76323

Appendix Table 4. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants						
		b_3	b_4	b_5	c_1	c_2	c_3	c_4
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	17.43	12.15	22.23	1.259	1.112	9.026	-3.688
5		12.19	17.38	22.17	1.211	1.132	2.454	2.458
10		12.34	17.54	22.45	1.309	1.087	2.52	2.638
15		12.26	22.36	17.41	1.366	1.093	2.565	-0.1094
20		7.776	17.37	22.2	1.073	2.404	1.062	2.454
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	-	-	-	-0.48930	0.04633	-	-
5		-	-	-	-0.31175	0.02324	-	-
10		-	-	-	-0.56737	0.04064	-	-
15		-	-	-	-0.51000	0.03658	-	-
20		-	-	-	-0.28745	0.04968	-	-

Appendix Table 4. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants				
		c_5	d_1	d_2	e	f
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	6.181	-	-	-	-
5		2.783	-	-	-	-
10		2.875	-	-	-	-
15		2.781	-	-	-	-
20		2.676	-	-	-	-
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	-	-9.11591	-1.26027	-0.50455	-4.35598
5		-	-9.16442	1.76318	-0.32927	-2.34533
10		-	-8.41445	1.60137	-0.58481	-4.69576
15		-	-9.14452	-5.90583	-0.52145	-4.43124
20		-	-9.22525	-0.00061	-0.30054	-2.10746

Appendix Table 5. The r^2 , relative error, and mean absolute error values coming from Eq. (8) and Eq. (9), and their Padé approximations for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	r^2	Relative error (%)	Mean absolute error
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	0.9545	16.6249	1.0632
5		0.9240	28.8298	1.3481
10		0.9335	22.3415	1.3172
15		0.9389	21.0810	1.2808
20		0.9276	25.2808	1.4141
Average		0.9357	22.8316	1.2847
0 (Pure diesel)	Padé approximation	0.3224	16.5582	5.3074

5	of Sine (Eq. (8))	0.3763	28.8159	5.0280
10		0.4200	22.2565	4.7129
15		0.2573	21.0725	5.5438
20		0.2944	25.2744	5.5484
Average		0.3341	22.7955	5.2281
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	0.9852	5.7504	0.6740
5		0.9805	11.5225	0.7434
10		0.9762	6.7997	0.9321
15		0.9118	7.3347	1.2019
20		0.9025	2.3499	1.2815
Average	0.9512	6.7514	0.9666	
0 (Pure diesel)	Padé approximation of Piecewise (Eq. (9))	0.9804	5.7504	0.7964
5		0.9805	11.5225	0.7409
10		0.9763	6.7997	0.9311
15		0.9118	7.3348	1.2019
20		0.9025	2.3500	1.2814
Average	0.9503	6.7515	0.9903	

Appendix Table 6. The r^2 , relative error, and mean absolute error values coming from Eq. (8) and Eq. (9), and their Padé approximations for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	r^2	Relative error (%)	Mean absolute error
0 (Pure diesel)	Sine (Eq. (8))	0.9383	20.2908	1.2574
5		0.9642	12.3517	0.9354
10		0.9463	18.8404	1.1893
15		0.9354	21.4228	1.3044
20		0.9768	9.2555	0.7927
Average		0.9522	16.4322	1.0958
0 (Pure diesel)	Padé approximation of Sine (Eq. (8))	0.0905	20.2883	5.6050
5		0.0862	12.3512	5.7791
10		0.0109	18.8363	6.0497
15		0.1733	21.4199	5.5042
20		0.1076	9.2559	5.3405
Average		0.0937	16.4303	5.6557
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (9))	0.9793	5.8774	0.7923
5		0.9764	3.6699	0.8142
10		0.9808	3.8426	0.7876
15		0.9794	6.4867	0.7814
20		0.9808	2.2611	0.7771
Average		0.9793	4.4275	0.7905
0 (Pure diesel)	Padé approximation of Piecewise (Eq. (9))	0.9793	5.8772	0.7920
5		0.9764	3.6698	0.8142
10		0.9799	3.8426	0.8232
15		0.9794	6.4866	0.7813
20		0.9808	2.2609	0.7778
Average		0.9792	4.4274	0.7977

Appendix Table 7. Regression constants of the piecewise equation (Eq. (10)) for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (10))	8.22380	10.61204	-3.23415	-0.02448	-0.33508	-0.22091
5		3.80474	10.20356	-4.62354	0.04243	-0.47497	-0.32678
10		5.90853	8.41127	-4.46131	0.05494	-0.46152	-0.33204
15		14.28259	11.90488	2.00227	-0.07520	0.05609	-0.19699
20		14.57193	11.11728	1.99629	-0.04330	0.05407	-0.23786
Average							

Appendix Table 7. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		d_1	d_2	e_1	e_2	f_1	f_2
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (10))	-11.37961	16.80460	-0.35157	0.18721	-4.17335	26.87172
5		-10.32028	15.43546	-0.48798	0.15014	-5.35529	39.14301
10		-10.55624	17.50194	-0.47895	0.20002	-5.37384	37.08696
15		-21.28344	21.32535	0.06078	0.13635	2.36784	34.12016
20		-21.51955	20.91682	0.05772	0.11891	2.25004	40.06140
Average							

Appendix Table 8. Regression constants of the piecewise equation (Eq. (10)) for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	c ₁	c ₂
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (10))	11.74727	12.49190	-3.55641	-0.03718	-0.48930	-0.23466
5		15.77979	13.52185	-1.50551	-0.13344	-0.31175	-0.14453
10		13.08163	13.50237	-3.75826	-0.07436	-0.56737	-0.23366
15		10.38882	12.91867	-3.80176	-0.05184	-0.51000	-0.21493
20		13.76048	13.94956	-1.40068	-0.13647	-0.28745	-0.24210

Appendix Table 8. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		d ₁	d ₂	e ₁	e ₂	f ₁	f ₂
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (10))	-9.11591	18.91832	-0.50455	0.14173	-4.35598	36.29648
5		-9.16442	21.66059	-0.32927	0.19215	-2.34533	29.55688
10		-8.41445	19.50540	-0.58481	0.19374	-4.69576	28.37379
15		-9.14452	18.85122	-0.52145	0.08771	-4.43124	37.10636
20		-9.22525	20.38284	-0.30054	0.24352	-2.10746	30.11443

Appendix Table 9. Regression constants of the piecewise equation (Eq. (11)) for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	32.56	3.845	37.02	31.94	29.36	10.61204
5		24.44	3.657	27.54	46.88	45.24	10.20356
10		11.9	21.38	41.99	4.879	38.58	8.41127
15		8.56	7.47	67.83	153	62.01	11.90488
20		7.979	6.978	125.2	120	44.11	11.11728

Appendix Table 9. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	7.755	25.44	6.173	33.41	33.97	-0.02448
5		6.115	21.12	4.367	31.38	31.88	0.04243
10		7.695	2.767	30.95	23.89	31.59	0.05494
15		8.276	24.11	29.34	0.2841	29.8	-0.07520
20		8.387	23.61	29.53	29.78	0.9433	-0.04330

Appendix Table 9. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	0.4427	-0.691	2.769	-0.09667	-2.97	-0.22091
5		0.1658	-1.756	2.28	-0.2346	-3.146	-0.32678
10		0.7814	1.329	-0.5589	-0.7492	-3.394	-0.33204
15		0.7915	4.924	-2.087	0.1212	-5.012	-0.19699
20		0.9026	4.82	-1.898	-4.921	0.3896	-0.23786

Appendix Table 9. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants		
		d	e	f
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	16.80460	0.18721	26.87172
5		15.43546	0.15014	39.14301
10		17.50194	0.20002	37.08696
15		21.32535	0.13635	34.12016
20		20.91682	0.11891	40.06140

Appendix Table 10. Regression constants of the piecewise equation (Eq. (11)) for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	88.75	9.294	9.851	98.41	89.88	12.49190
5		52.7	10.89	4.375	32.49	29.27	13.52185
10		8.211	63.19	8.583	131.7	124.5	13.50237
15		7.788	105	7.118	85.92	80.36	12.91867
20		10.84	85.18	5.981	47.12	42.03	13.94956

Appendix Table 10. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	0.5271	7.802	25.48	29.68	30.06	-0.03718
5		0.9456	7.237	23.85	29.99	30.6	-0.13344
10		8.496	0.6916	25.18	29.84	30.08	-0.07436
15		9.061	0.3905	24.37	29.92	30.28	-0.05184
20		6.998	0.6569	25.44	29.95	30.44	-0.13647

Appendix Table 10. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	0.2555	0.6746	5.663	-1.81	-4.774	-0.23466
5		0.4749	0.405	4.784	-1.836	-4.692	-0.14453
10		0.936	0.3221	5.295	-1.977	-5.003	-0.23366
15		1.177	0.1786	5.137	-1.731	-4.705	-0.21493
20		0.2045	0.2982	5.414	-1.937	-4.848	-0.24210

Appendix Table 10. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants		
		d	e	f
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	18.91832	0.14173	36.29648
5		21.66059	0.19215	29.55688
10		19.50540	0.19374	28.37379
15		18.85122	0.08771	37.10636
20		20.38284	0.24352	30.11443

Appendix Table 11. Regression constants of the piecewise equation (Eq. (12)) for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	32.56	3.845	37.02	31.94	29.36	6.77598
5		24.44	3.657	27.54	46.88	45.24	11.42232
10		11.9	21.38	41.99	4.879	38.58	10.02813
15		8.56	7.47	67.83	153	62.01	19.42027
20		7.979	6.978	125.2	120	44.11	22.04874

Appendix Table 11. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	7.755	25.44	6.173	33.41	33.97	0.75714
5		6.115	21.12	4.367	31.38	31.88	1.83147
10		7.695	2.767	30.95	23.89	31.59	1.55554
15		8.276	24.11	29.34	0.2841	29.8	0.59948
20		8.387	23.61	29.53	29.78	0.9433	1.02745

Appendix Table 11. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants				
		c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	0.4427	-0.691	2.769	-0.09667	-2.97
5		0.1658	-1.756	2.28	-0.2346	-3.146
10		0.7814	1.329	-0.5589	-0.7492	-3.394
15		0.7915	4.924	-2.087	0.1212	-5.012
20		0.9026	4.82	-1.898	-4.921	0.3896

Appendix Table 11. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants	
		c_6	d
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	0.07427	5.11708
5		0.06283	-1.94341
10		0.06240	-1.12643
15		0.02968	-6.56398
20		0.03233	-11.27791

Appendix Table 12. Regression constants of the piecewise equation (Eq. (12)) for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	88.75	9.294	9.851	98.41	89.88	14.24844
5		52.7	10.89	4.375	32.49	29.27	15.37784
10		8.211	63.19	8.583	131.7	124.5	13.47703
15		7.788	105	7.118	85.92	80.36	17.89887
20		10.84	85.18	5.981	47.12	42.03	16.92187

Appendix Table 12. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	0.5271	7.802	25.48	29.68	30.06	1.01905
5		0.9456	7.237	23.85	29.99	30.6	0.00025
10		8.496	0.6916	25.18	29.84	30.08	0.51029
15		9.061	0.3905	24.37	29.92	30.28	0.96558
20		6.998	0.6569	25.44	29.95	30.44	0.76323

Appendix Table 12. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants				
		c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	0.2555	0.6746	5.663	-1.81	-4.774
5		0.4749	0.405	4.784	-1.836	-4.692
10		0.936	0.3221	5.295	-1.977	-5.003
15		1.177	0.1786	5.137	-1.731	-4.705
20		0.2045	0.2982	5.414	-1.937	-4.848

Appendix Table 12. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants	
		c ₆	d
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	0.04633	-1.26027
5		0.02324	1.76318
10		0.04064	1.60137
15		0.03658	-5.90583
20		0.04968	-0.00061

Appendix Table 13. The r², relative error, and mean absolute error values coming from Eqs. (10)-(12) for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	r ²	Relative error (%)	Mean absolute error
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (10))	0.9901	5.7504	0.4988
5		0.9849	11.5225	0.5046
10		0.9878	6.7997	0.5359
15		0.9180	7.3347	0.9713
20		0.9107	2.3499	0.9746
Average		0.9583	6.7514	0.6970
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (11))	0.9957	0.8526	0.3412
5		0.9900	10.0711	0.4485
10		0.9944	4.8528	0.3770
15		0.9842	4.4973	0.5640
20		0.9856	7.2607	0.5623
Average		0.9900	5.5069	0.4586
0 (Pure diesel)	Piecewise (Eq. (12))	0.9908	0.8526	0.5164
5		0.9856	10.0711	0.6873
10		0.9829	4.8528	0.7731
15		0.9780	4.4973	0.7946
20		0.9773	7.2607	0.8692
Average		0.9829	5.5069	0.7281

Appendix Table 14. The r^2 , relative error, and mean absolute error values coming from Eqs. (10)-(12) for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	r^2	Relative error (%)	Mean absolute error
0 (Pure diesel)		0.9872	5.8774	0.5181
5		0.9796	3.6699	0.6766
10	Piecewise (Eq. (10))	0.9864	3.8426	0.5840
15		0.9850	6.4867	0.5792
20		0.9881	2.2611	0.5332
Average		0.9853	4.4275	0.5782
0 (Pure diesel)		0.9906	4.2514	0.4490
5		0.9838	0.8669	0.5555
10	Piecewise (Eq. (11))	0.9875	4.3333	0.5408
15		0.9903	4.0377	0.4519
20		0.9913	0.1534	0.3990
Average		0.9887	2.7285	0.4792
0 (Pure diesel)		0.9827	4.2514	0.7233
5		0.9805	0.8669	0.6931
10	Piecewise (Eq. (12))	0.9819	4.3333	0.7443
15		0.9847	4.0377	0.6542
20		0.9840	0.1534	0.6429
Average		0.9828	2.7285	0.6916

Appendix Table 15. Regression constants of Eq. (13) for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2
0 (Pure diesel)		234.5	5887	7.499e4	5.521e5	3.575	520.4
5		108.6	1163	1.403e4	1.877e5	-10.27	8.55
10	Eq. (13)	89.07	386.8	8821	2.474e5	-15.91	-11.18
15		134.5	565.6	8159	2.066e5	-19	159.1
20		123.7	8.992	3517	1.739e5	-19.53	94.49

Appendix Table 15. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants	
		b_3	b_4
0 (Pure diesel)		8140	3.893e4
5		2479	1.522e4
10	Eq. (13)	2867	1.905e4
15		2516	1.165e4
20		2189	1.058e4

Appendix Table 16. Regression constants of Eq. (13) for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	Regression constants					
		a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2
0 (Pure diesel)		107.7	2685	2.832e4	2.845e5	-19.25	251
5		86.38	8923	1.914e5	1.386e6	-25.13	1230
10	Eq. (13)	171.1	4721	5.152e4	3.82e5	-14.02	461.3
15		116.6	1848	1.693e4	2.415e5	-19.37	201.8
20		115.8	1377	2.191e4	3.305e5	-17.88	195.5

Appendix Table 16. (Continued)

Octanol Content	Equation	Regression constants	
		b_3	b_4
0 (Pure diesel)		3918	1.661e4
5		1.538e4	6.624e4
10	Eq. (13)	5377	2.041e4
15		3332	1.462e4
20		2827	1.666e4

Appendix Table 17. The r^2 , relative error, and mean absolute error values coming from Eq. (13) for Yeşilyurt and Çakmak's data [8]

Octanol Content	Equation	r^2	Relative error (%)	Mean absolute error
0 (Pure diesel)	Eq. (13)	0.9883	1.6441	0.6273
5		0.9922	1.7033	0.5767
10		0.9960	1.1325	0.3557
15		0.9978	1.5626	0.2869
20		0.9950	0.0502	0.4663
Average		0.9939	1.2185	0.4626

Appendix Table 18. The r^2 , relative error, and mean absolute error values coming from Eq. (13) for Çakmak et al.'s data [33]

Octanol Content	Equation	r^2	Relative error (%)	Mean absolute error
0 (Pure diesel)	Eq. (13)	0.9925	1.9242	0.5028
5		0.9721	0.2319	0.9537
10		0.9859	2.4487	0.7473
15		0.9966	1.8238	0.3499
20		0.9950	1.4900	0.4419
Average		0.9884	1.5837	0.5991





Optimal sizing of grid-connected hybrid energy systems for electric vehicle charging stations considering charging demand periods and economic parameters

Elektrikli araç şarj istasyonları için şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin şarj talep dönemleri ve ekonomik parametreler göz önünde bulundurularak optimum boyutlandırılması

Alpaslan Demirci* 

Department of Electrical Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

Abstract

The development of electric vehicle (EV) technologies and the spread of EVs have made expanding charging infrastructure increasingly critical. However, unplanned sizing of EV charging stations will have adverse technical, economic, and environmental impacts, especially on grid reliability and energy costs. This study performs a techno-economic evaluation of a solar PV-based hybrid power system considering variations in EV charging demand profiles and economic parameters. The results show that variations in demand profile and economic parameters significantly influence investment decisions. Higher inflation was most effective on peak evening demand profiles, increasing the levelized cost of energy by up to 2.2 times. Self-sufficiency can increase to 57% under grid sales constraints in the midday peak scenario. Moreover, at maximum installed PV capacity, the self-consumption rate (SCR) is 12% higher than in the evening peak, and curtailment is reduced by up to 4.5%. The results will expand the use of renewable energy with less grid dependency and faster achievement of zero carbon emission targets.

Keywords: Electric vehicle, Electric vehicle charging station, Energy storage systems, Hybrid power system, Optimization, Renewable energy source.

1 Introduction

As global temperatures reached alarming levels, countries had to turn to new energy alternatives. Moreover, it is necessary to reduce the negative impact of energy-consumption vehicles, especially fossil fuel-dependent cars, on the environment. It promises that by 2050, the share of EVs in the automobile market will reach 81.5%, and the share of renewables in energy production will get 88% with net zero emission commitments set in global partnerships to which countries are a party. The widespread penetration of electric vehicles (EVs) could reduce the role of transportation in environmental pollution. However, the increased energy demand for EVs will increase the peak load capacity of the grid. Therefore, integrating renewable technologies is increasingly important to meet the growing

Özet

Elektrikli araç (EA) teknolojilerinin gelişmesi ve EA'ların yaygınlaşması, şarj altyapısının genişletilmesini giderek daha kritik hale getirmiştir. Plansız EA şarj istasyonu boyutlandırması, özellikle şebeke güvenilirliği ve enerji maliyetleri üzerinde olumsuz teknik, ekonomik ve çevresel etkilere sahip olacaktır. Bu çalışmada, EA şarj talep profilleri ve ekonomik parametrelerdeki değişimleri göz önünde bulundurularak, güneş fotovoltaik tabanlı hibrit güç sisteminin tekno-ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlar, talep profilindeki ve ekonomik parametrelerdeki değişkenliklerin yatırım kararlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Yüksek enflasyon en çok pik gece şarj talebi profillerinde etkili olmuş ve seviyelendirilmiş enerji maliyetini 2,2 katına kadar artırmıştır. Şebeke satış kısıtlamaları altında öğlen zirve senaryosunda kendi kendine yeterlilik %57'ye kadar artabilir. Dahası, maksimum fotovoltaik kurulu gücünde öz tüketim oranı akşam zirve senaryosuna göre 12% daha yüksek olmayı başarmış ve faydalanılamayan enerji %4,5'e kadar azalmıştır. Sonuçlar, şebekeye daha az bağımlı yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştıracak ve sıfır karbon emisyonu hedeflerine daha hızlı ulaşılmasını sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, elektrikli araç şarj istasyonu, enerji depolama sistemleri, hibrit güç sistemi, optimizasyon, yenilenebilir enerji kaynağı

demand for EV charging stations (EVCS) without grid dependency. Analyses of sensitivity and incorporating inflation rates (IR) and discount rates (DR) into financial models are required for optimal diesel generator (DG) allocation. This allows for a more comprehensive assessment of different allocation decisions' economic viability and potential risks. IR can affect the cost of materials and labor required to construct renewable energy facilities. Therefore, as IR increases, project costs may also increase. Higher project costs may affect optimal allocation decisions, making DGs less attractive. IR&DR are linked, and higher DR can affect the cost of borrowing for hybrid power system projects. Higher DR increases the cost of capital and potentially reduces financing options' attractiveness. Therefore, optimal sizing may be affected as projects with higher financing costs become less favorable. On the other

* Corresponding author, e-posta / e-mail: ademirci@yildiz.edu.tr (A. Demirci)

Geliş / Recieved: 02.07.2023 Kabul / Accepted: 17.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1321628

hand, IR can affect investment returns for DG projects. Therefore, it is important to consider inflation-adjusted returns when assessing the financial viability of DG projects. Higher IR can reduce real returns. IR can also affect electricity tariffs and revenues from DG systems. If electricity tariffs are not indexed to inflation, the purchasing power of income from DG projects may decline over time. So, IR&DR are critical inputs when conducting discounted cash flow analysis, which is widely used to assess the financial feasibility of DG projects. Higher IR can affect the present value of future cash flows by affecting the DR used in cash flow analysis. These rates can alter the financial attractiveness of DG projects and influence optimal allocation decisions.

Various studies analyze the optimal sizing of HPS and its possible technical, economic, and environmental effects. The energy demand at EVCS, which is almost universal, can be supplied by PV. EVCS optimal installation points are determined by a four-stage analysis that works in harmony with the GIS-based approach to improve system performance [1]. The available PV capacity was determined as 3.1 MW for 100 EV charging points and 11.1 GW across the US [2]. Self-consumption data in five different Chinese cities were improved with a new methodology developed to avoid bicycle charging current limit at public transportation stations and to use PV effectively in different irradiances [3]. Thanks to the optimization approach developed, cumulative CO₂ was reduced by up to 15%, while EV charging demand was met by over 93% [4]. The multi-objective optimization model reduced COE to 0.046 \$/kWh and CO₂ to 472.4 g [5]. In another study, where supply-demand uncertainties were removed with Monte Carlo and EV charging was determined with the Erlang B queuing model, the annual energy cost purchased from the grid was reduced by 74.2%. In comparison, the revenue from energy sales increased by 19.86% [6]. The system's operating costs were reduced by 42.8% using an economic linearized stochastic programming strategy that included the electricity tariff [7]. In building communities with EVCS, by removing biomass generators from the optimal configuration, COE was decreased by 17.5%, while energy supply was increased by 8.33% [8]. In another study, optimizing using ABC&PSO improved RF by up to 87%, while COE and LPSP were reduced to \$0.038/kWh and 0.19%, respectively [9].

Although the optimization methods focus on optimal sizing, the network needs strengthening due to increasing demand and capacity constraints. Time of Use (TOU) is a pricing structure used primarily in the energy and utility industries to charge customers based on the hours they use electricity or other utilities. TOU pricing aims to create a more efficient and sustainable electricity system by aligning consumer behavior with daily energy supply and demand fluctuations [10]. This encourages consumers to use electricity while it is cheaper, which can ultimately lead to cost savings and a more reliable grid. However, its success depends on consumer education and their ability to change their routines to take advantage of lower off-peak prices. TOU pricing can be complex for consumers to understand and manage. Consumers may face higher initial bills if they

do not change their habits to take advantage of off-peak pricing [11]. Evidence shows that small to medium-sized commercial customers are willing to reduce their peak energy consumption due to TOU pricing [12]. The energy management strategy developed based on TOU considers the benefits of network operators and users, reduces costs, and shortens the payback period to 5.17 years [13]. In recent years, TOU and real-time pricing have received increasing attention, especially with the advent of the smart grid, which allows the implementation of TOU [14–16].

Grid operators must use each generating and consuming system for different grid services. By playing an active role in the energy market, power quality issues in the grid can be addressed, while the potential of the smart grid can be enhanced with more options for customers. The performance of the solar EVCS is evaluated using accurate load data and meteorological measurements, considering the seasonal effect of PV generation. The PV generation size and EV charging connection time were varied and analyzed under different scenarios, and it was observed that level-2 charging does not cause voltage instability. It was also emphasized that it could reduce the probability of under-voltage problems, transformer overload, and losses due to PV generation and EV charging demand [17]. It has been determined that the carbon footprint of solar EVCS with energy storage systems (ESS) can be reduced by up to 15% with an environmentally optimized design [4]. These studies mostly optimized system sizing by considering variables such as EV charging, PV capacity, and solar irradiance variations. However, the uncertainty associated with EV charging and the potential for economic parameters such as IR&DR to fluctuate has not been simultaneously analyzed. This study explores the potential for integrating renewable energy system (RES) into EVCS by considering EV charging demand periods and financial parameter variability. The original contributions of this paper are as follows:

- Techno-economic evaluation of a grid-connected hybrid power system for electric vehicle charging stations has been performed.
- Investment decisions are significantly influenced by variations in the demand profile and economic parameters.
- The performance of the hybrid energy system is examined in detail through sensitivity analysis.
- The potential for direct energy transfer from PV to load and the techno-economic impacts are analyzed according to the variation in the demand period.
- The leveled energy cost increases by up to 55% in the evening peak, depending on the variation in economic parameters.

This paper investigates the potential of retrofitting EVCSs with solar PV, considering variations in energy demand times for EVCS and economic parameters such as IR&DR.

2 Material and method

2.1 Location and climatic data

Antalya city in Türkiye is 36° 53.8' latitude and 30° 42.8' longitude. Figure 1 shows Antalya's average solar radiation, temperature, and clearness index data [18].

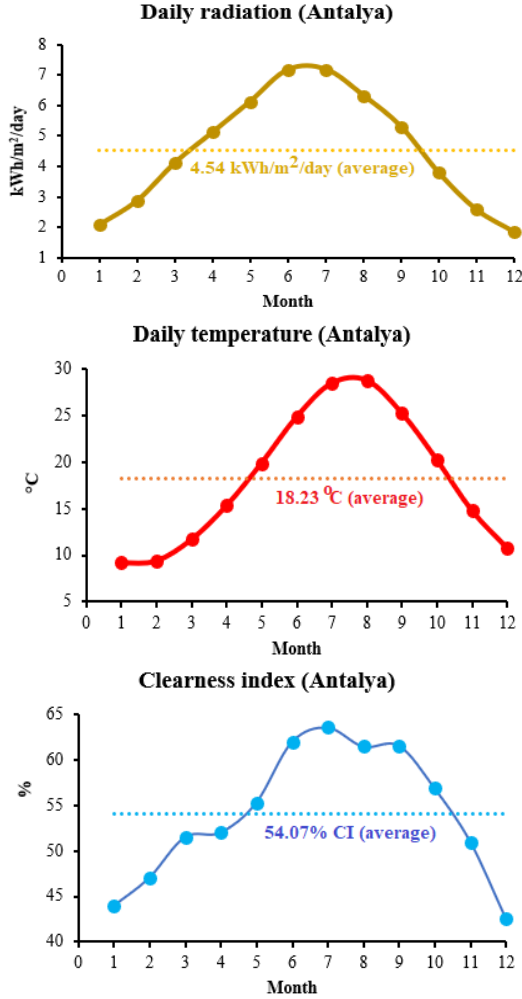


Figure 1. Solar radiation, temperature, and clearness index (CI) data in Antalya.

Average solar radiation data for each month is obtained from the National Aeronautics and Space Administration (NASA) using the software database. The data is Antalya's average daily radiation, average temperature, and average clearness index is 4.54 kWh/m²/day, 18.23°C, and 54.07%.

2.2 Solar photovoltaic panel

The solar photovoltaic panel is the main component of HPS. The PV array performance varies depending on solar radiation, panel temperature, derivative factor (DF), and panel efficiency. The amount of power produced by the PV array at time t $P_{PV}(t)$ is given in Equation (1), the maximum efficiency formula of PV panels under normal conditions (STC) $\eta_{mp,STC}$ is given in Equation (2), and cell temperature at time t $T_C(t)$ formula of PV array under operating condition is given in Equation (3) [19]. Where Y_{PV} is PV array rated capacity in STC (kW), f_{PV} is PV derating factor (%), $G_T(t)$

is solar radiation at time t (kW/m²), $G_{T,STC}$ is measurement of incident radiation at STC (1 kW/m²), α_P is temperature coefficient of power (0.1%/°C), $T_a(t)$ is ambient temperature at time t (°C), T_{NOCT} is normal operation cell temperature (°C), and A_{PV} is area of the PV panel (m²) [20].

$$P_{PV}(t) = \frac{Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot G_T(t) \cdot [1 + \alpha_P \cdot (T_C - T_{C,STC})]}{G_{T,STC}} \quad (1)$$

$$\eta_{mp,STC} = \frac{Y_{PV}}{A_{PV} \cdot G_{T,STC}} \quad (2)$$

$$T_C(t) = T_a(t) + \frac{G_T(t) \cdot (T_{NOCT} - 20)}{800} \quad (3)$$

2.3 Converter (inverter and rectifier)

Converters are required for energy flow between DC and AC systems in HPS. It consists of a converter, rectifiers, and an inverter. Proper sizing of the converter power is critical in correctly sizing the HPS model. A small converter can curtail a considerable amount of energy. The power output formula of the inverter at time t $P_{inv}(t)$ is shown in Equation (4), and the power output formula of the rectifier at time t $P_{rec}(t)$ is seen in Equation (5) [21]. Where $P_{DC}(t)$ is DC power input at time t (kW), $P_{AC}(t)$ is AC power input at time t (kW), η_{inv} is inverter efficiency (%), and η_{rec} is rectifier efficiency (%).

$$P_{inv}(t) = \eta_{inv} \cdot P_{DC}(t) \quad (4)$$

$$P_{rec}(t) = \eta_{rec} \cdot P_{AC}(t) \quad (5)$$

2.4 EVCS and peak time ranges

The time horizon for the charging of each j EV of type e (hour) ($\tau_{e,j}$) is given in Equation (6), the charge power of each j EV of type e at time t (kW) ($P_{EV(e,j)}(t)$) in Equation (7), and total EV power at time t (kW) (P_{EV}^t) are given in Equation (8) [22]. Where $st_{e,j}$ is starting charge time of j EV of type e (hour), ER_e is average required energy for EV type e (kWh), $P_{EV(max)}$ is maximum charging power in slow mode for EV type e (kW), $P_{EV(j,t)}$ is charging power of j EV of type e at time t (kW), N_{EV} is the number of EV, j is EV user index, t is time index (hour), and e is EV type ($e = 1$ cars).

$$\tau_{e,j} = \left[st_{e,j} + \frac{ER_e}{P_{EV(max)}} \right] \quad (6)$$

$$P_{EV(e,j)}(t) = \begin{cases} P_{EV(max)} & \text{if } t \in \tau_{e,j} \\ 0 & \text{if } t \notin \tau_{e,j} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{EV}^t = \sum_{j=1}^{N_{EV}} P_{EV(e,j)}(t) \quad (8)$$

Table 1 shows the different EVCS peak times and daily energy demands. This study created EVCS load profiles considering three different peak time periods. The average daily demand of EVCSs is 2500 kWh/day. In addition, the peak charging demand times are between 07.00-09.00 in the morning in EVCS1, 11.00-13.00 in EVCS2, and 17.00-19.00 in EVCS3.

Table 1. EVCS peak times and daily energy demands

	EVCS Types		
	EVCS1	EVCS2	EVCS3
Peak Time Range	07.00-09.00 Morning Peak	11.00-13.00 Midday Peak	17.00-19.00 Evening Peak
Energy Demand	2479 kWh/day	2505 kWh/day	2496 kWh/day

2.5 Energy storage system

Energy storage system (ESS) stores the excess energy produced, supplies energy to the HPS that needs energy, and provides a constant voltage in case of incompatibility between power generation and consumption. Thus, they establish the balance between the energy produced and the load demand. The capacity value of the ESS (C_{ESS}) is given in Equation (9). Where E_{load} is average daily load energy (Ah), D_{ESS} is number of days energized by ESS, DOD_{max} is

battery maximum discharge depth [%], η_{ESS} is ESS efficiency [%], and η_{inv} is inverter efficiency [%] [23, 24].

$$C_{ESS} = \frac{E_{load} \cdot D_{ESS}}{1000 \cdot DOD_{max} \cdot \eta_{ESS} \cdot \eta_{inv}} \quad [kWh] \quad (9)$$

2.6 HPS models and cost prices

Hybrid energy systems are defined as systems that use multiple energy sources such as solar and wind, solar and diesel generators, wind and diesel generators, or solar, wind, and diesel generator systems to power the electrical load and can integrate with the electricity grid [25]. Figure 2 shows the HPS model. Capital, replacement, and operation & maintenance (O&M) costs of HPS components are given in Table 2 [26]. The project lifetime of the HPS is 20 years.

Table 2. EVCS model component prices

	HPS Model Components		
	PV	ESS	Converter
Capital Cost	1000 \$/kW	300 \$/kWh	300 \$/kW
Replacement Cost	900 \$/kW	250 \$/kWh	300 \$/kW
O&M Cost	10 \$/kW/yr	2 \$/kWh/yr	0.02 \$/kW/yr

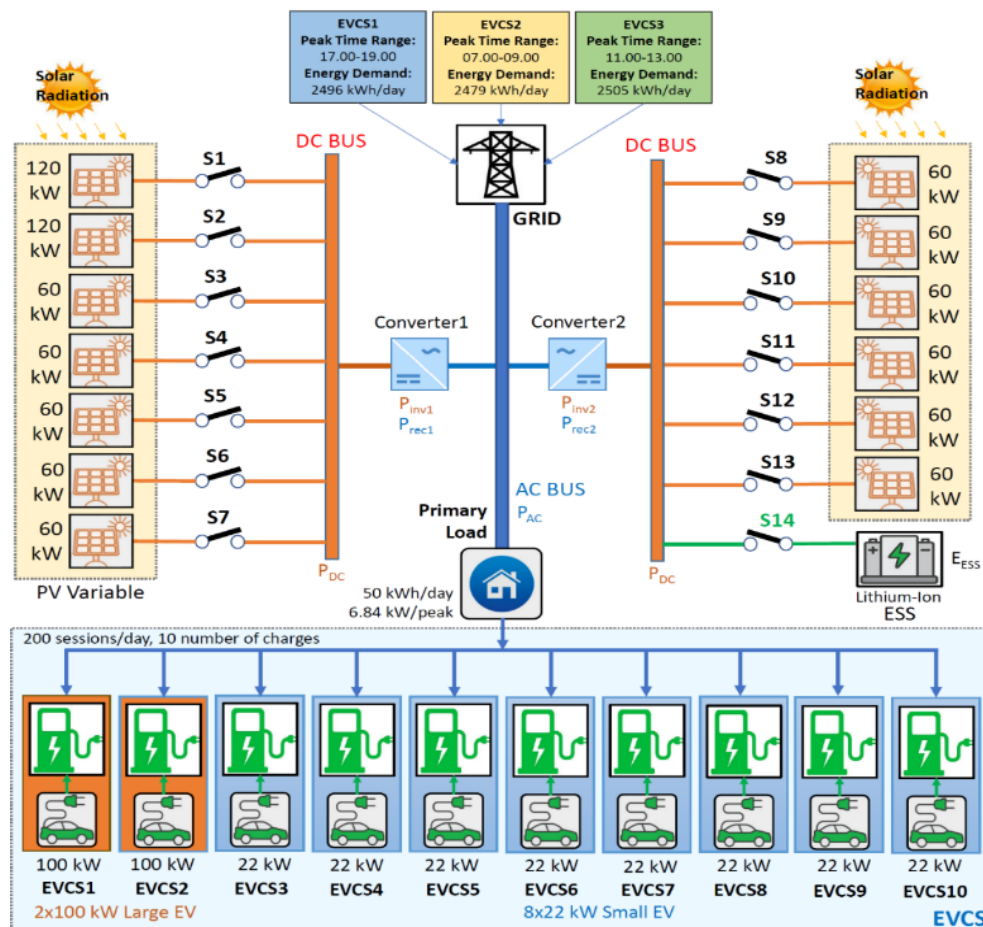


Figure 2. HPS models.

2.7 Grid tariffs and prices

The three-tariff system has been considered in energy purchase and sale, and the purchase-sale cost values of this three-tariff are given in Table 3 [27].

Table 3. Grid price tariffs

Grid Properties	Time Range	Grid Price (\$/kWh)	
Grid Purchases (TOU)	Flat Tariff	06.00-17.00	0.100
	Peak Tariff	17.00-22.00	0.160
	Valley Tariff	22.00-06.00	0.056
Grid Sales	24 hours	0.051	

2.8 Economic parameters

The net present cost (NPC) of the system is obtained by subtracting the present value of all costs over the project's life from the present value of all income earned during the project's lifespan. It includes capital cost, replacement cost, O&M cost, grid purchases, and emission cost penalties. HOMER software calculates the NPC value by summing the discounted cash flows at the end of each year. The annual cost is multiplied by the NPC value by the capital recovery factor. NPC (\$) at the end of the project lifespan is given in Equation (10), capital recovery factor ($CRF(i, N)$) in Equation (11), and annual real DR (%) (i) in Equation (12) [28]. Where $C_{ann,tot}$ is total annualized cost (\$/yr), N is project lifetime (year), n is number of years, i' is nominal DR (%), and f is expected IR (%).

$$NPC = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, N)} \text{ [\$]} \quad (10)$$

$$CRF(i, N) = \frac{i \cdot (1 + i)^N}{i \cdot (1 + i) - 1} \quad (11)$$

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (12)$$

The average cost per kWh of useful energy produced by the HPS represents the levelized cost of energy (\$/kWh). It is a suitable metric for comparing HPSs. Equation (13) shows the formula for the COE [29]. Where E_{served} is total electrical load served (kWh/yr).

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \text{ [$/kWh]} \quad (13)$$

Renewable fraction (RF) is a fraction display that shows the rate at which the total annual energy power generation from RES is transferred to the load. The ratio of RES to the loads in the system is managed in this fraction notation. Equation (14) represents the RF [30, 31].

$$RF = 1 - \frac{E_{nonren}}{E_{served}} \text{ [%]} \quad (14)$$

The self-consumption rate (SCR) is the ratio between the total PV energy directly transferred to the load ($\sum E_{PV}^{cons}$), and the total PV energy ($\sum E_{PV}^{gen}$), shown in Equation (15) [32]. The ratio between the total RES generation directly transferred to the load and the annual total load demand ($\sum E_{LOAD}$) gives the self-supply rate (SSR). For the SSR to increase, the share of PV should increase according to the load demand. Equation (16) shows the formula for the self-supply ratio [33]. Equation (17) shows the objective function (f) of HPS. The function aims to determine the HPS that minimizes the NPC value.

$$SCR = \frac{\sum E_{PV}^{cons}}{\sum E_{PV}^{gen}} \text{ [%]} \quad (15)$$

$$SSR = \frac{\sum E_{PV}^{cons}}{\sum E_{LOAD}} \text{ [%]} \quad (16)$$

$$f = \min \left(\sum_{n=1}^N NPC \right) \quad (17)$$

Table 4 shows HPS scenarios [34]. HPS scenarios have been created for three different IR&DR parameters. The grid energy sales constraint is considered in the analyses. Also, the maximum PV installed capacity is set at 900kW, considering the limited installed area in EVCSs [35]. The performance of each scenario is evaluated by considering the self-consumption rate, self-sufficiency rate, excess energy, and energy cost parameters.

Table 4. HPS scenarios

Parameters	Case 1	Case 2	Case 3
Inflation rate (IR)	1.30%	7.40%	14.0%
Discount rate (DR)	4.30%	8.49%	23.3%
Grid sale constraint	with GSC, without GSC		
PV capacity	0-120-240-300-360-420-480-540-600-660-720-780-840-900 kW		

3 Optimization results

Prosumers' investment decisions are significantly affected by IR&DR. This section determines the optimal PV capacities according to demand profiles with different peak times for IR&DR. Moreover, the impact of increased PV capacity on technical, economic, and environmental outcomes is assessed. Figure 3 shows that, regardless of the peak time of the load, the optimal PV capacity increases with the increase in IR&DR. It can also be said that SCR decreases and SSR and EE increase with increasing PV capacity in each profile. At optimum PV capacities and highest IR (Case 3), SCR and SSR decrease to 45% and 43%, while EE increases to 33.6% during the morning peak. Increasing PV capacity reduces SCR to 34%, 40%, and 28% in the morning, midday, and evening peak scenarios. So,

SCR is 12% lower in the evening peak than in the midday scenario. In addition, the curtailment energy due to load mismatch is 4.5% higher.

On the other hand, SSR increased to 57% in the midday peak scenarios but could only increase to 48% and 40% in the morning and evening peak, depending on the PV capacity increases. The COE increases with each peak profile for most PV capacities, especially at the lowest inflation. High IR increased the levelized cost of energy by up to 19.2%, 28%,

and 20.3% in the morning, midday, and evening peak optimal scenarios, respectively. PV capacities that minimize COE and keep SCR within limits were selected as optimum. Optimal PV capacity increased by 2.5 times during the highest IR compared to under lower IR optimal scenarios for the morning peak. This ratio increased PV capacity by up to 1.8 times and 3 times, respectively, during the midday and evening peak periods in the optimal case for the same situation.

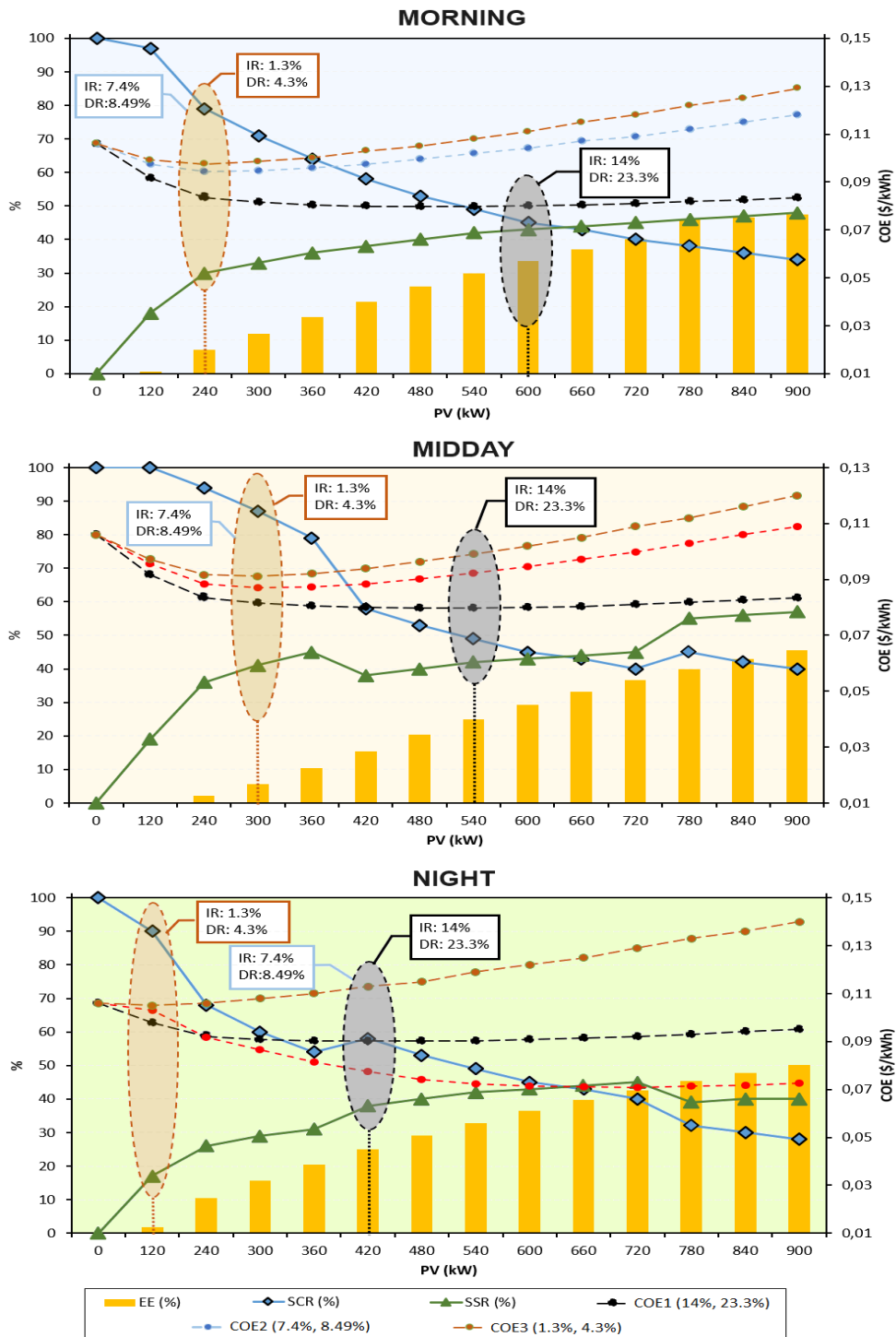


Figure 3. EVCS self-consumption and self-sufficiency change with GSC

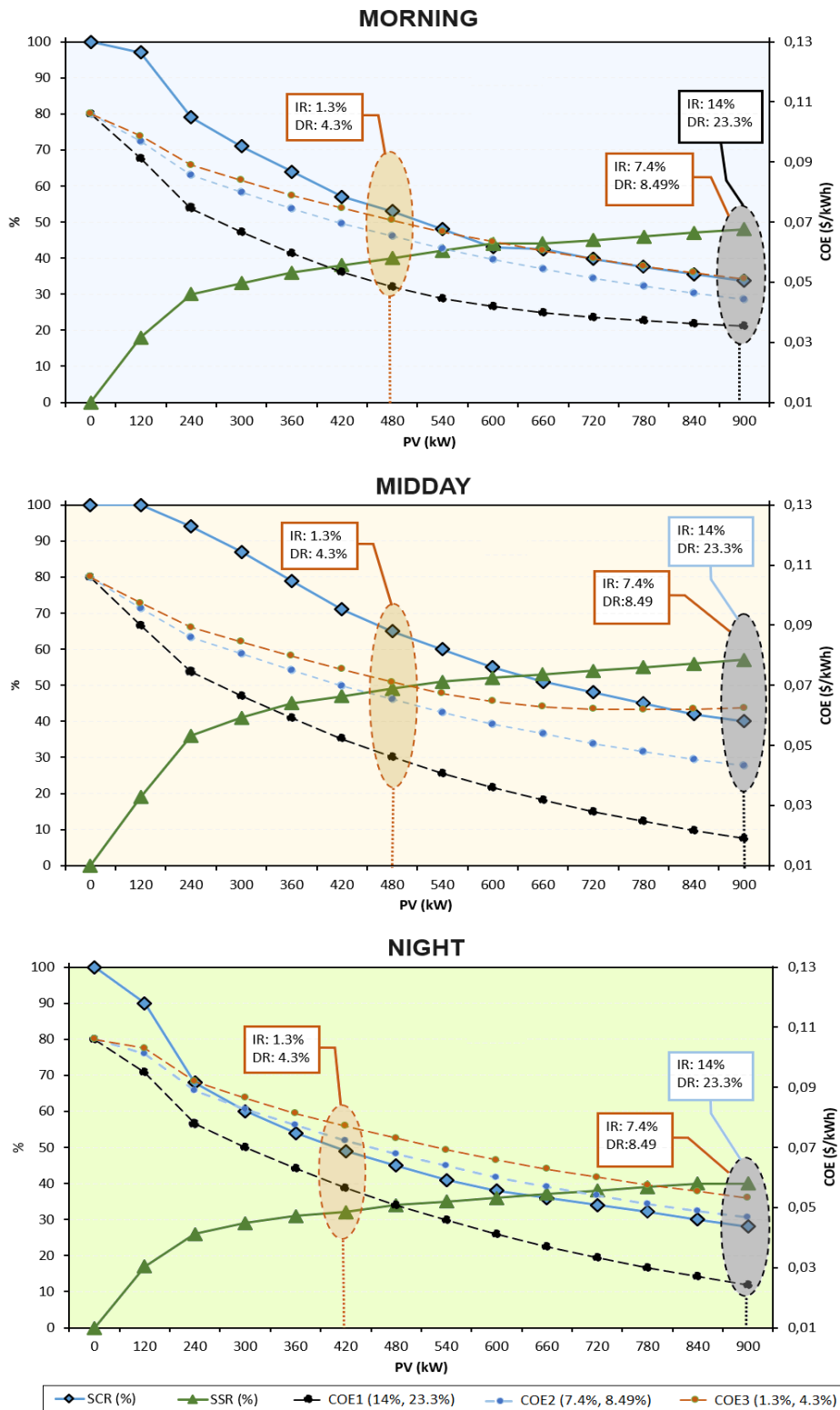


Figure 4. EVCS self-consumption and self-sufficiently change without GSC

Figure 4 shows that EE and COE have decreased with grid sales, and the optimal PV capacity has increased. The absence of over-generated electricity indicates that the sizing strategy is quite important. It can be noted that the revenue received from the sale of electricity to the grid affects the COE and the optimal PV capacity associated with the COE.

In this context, SCR and SSR were not much affected by the economic rate and peak time. As IR increased (Case 3), optimal PV capacity increased by 53% for morning and midday peaks and 47% for evening.

The optimal COE decreased by 55.3%, 32.3%, and 28.2% at the morning peak for cases 1, 2, and 3, respectively.

In the case of high IR (Case 3), the SCR decreased by 19.3%, 25%, and 21% in the morning, midday, and evening peak periods, respectively. It should be noted that the SSR increased by 8% in the same situation.

With sales to the grid, SCR was more affected by the evening peak and SSR more by the midday peak. These values will decrease with decreasing inflation. Regardless of the peak time, at high and medium IR (Case 2 and 3), the optimal PV capacity and, thus, the probability of load coverage by the PV is maximized. On the other hand, SSR does not improve the optimal selection of PV capacity at evening peaks and low IR.

4 Conclusion

This paper investigates the potential of retrofitting EVCSs with solar PV, considering variations in energy demand times for EVCS and economic parameters such as IR&DR. Optimization results show that inflation increases COE by up to 28%, depending on different peak charging periods. The increased PV capacity further reduced the SCR by up to 12% for the evening peak. Optimal SSR was 30%, 41%, and 17% for morning, midday, and evening peak, respectively, in the low inflation scenarios. Higher inflation was most affected in the evening peak, increasing the levelized cost of energy by up to 2.2 times. In the optimal scenario with morning peak demand, the SCR increases up to 79% at low inflation but decreases to 45% as inflation increases. In contrast, for the same economic conditions in the evening peaks, the SCR decreases by 32%. The results demonstrate the benefits of EVCS optimization to clean energy management from multiple perspectives, which can support the development of EVCS policies. Future studies should improve the optimal hybrid system sizing methodology considering solar radiation potential, hybrid system installation costs, carbon tax, and incentives.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (Turnitin): 13%

References

- [1] M. Erbaş, M. Kabak, E. Özceylan and C. Çetinkaya, Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis. *Energy*, 163, 1017–1031, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.140>.
- [2] S. S. Deshmukh and J. M. Pearce, Electric vehicle charging potential from retail parking lot solar photovoltaic awnings. *Renewable Energy*, 169, 608–617, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.068>.
- [3] R. Yin and J. He, Design of a photovoltaic electric bike battery-sharing system in public transit stations. *Applied Energy*, 332, 1–15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120505>.
- [4] L. Bartolucci, S. Cordiner, V. Mulone, M. Santarelli, F. Ortenzi and M. Pasquali, PV assisted electric vehicle charging station considering the integration of stationary first- or second-life battery storage. *Journal of Cleaner Production*, 383, 1–18, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135426>.
- [5] B. Sun, A multi-objective optimization model for fast electric vehicle charging stations with wind, PV power and energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 288, 1–17, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125564>.
- [6] J. A. Domínguez-Navarro, R. Dufo-López, J. M. Yusta-Loyo, J. S. Artal-Sevil and J. L. Bernal-Agustín, Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 46–58, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.001>.
- [7] M. Farrokhifar, F. H. Aghdam, A. Alahyari, A. Monavari and A. Safari, Optimal energy management and sizing of renewable energy and battery systems in residential sectors via a stochastic MILP model. *Electric Power Systems Research*, 187, 1–13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2020.106483>.
- [8] S. Kumar and S. Koteswara Rao, Optimum capacity of hybrid renewable energy system suitable for fulfilling yearly load demand for a community building located at Vaddeswaram, Andhra Pradesh. *Energy and Buildings*, 277, 1–14, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.11257>.
- [9] S. Singh, P. Chauhan and N. J. Singh, Feasibility of Grid-connected Solar-wind Hybrid System with Electric Vehicle Charging Station. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9 (2), 295–306, 2021. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000081>.
- [10] S. Amiri-Pebdani, M. Alinaghian and S. Safarzadeh, Time-Of-Use pricing in an energy sustainable supply chain with government interventions: A game theory approach. *Energy*, 255, 1–18, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124380>.
- [11] S. Panda, S. Mohanty, P.K. Rout, B.K. Sahu, M. Bajaj, H.M. Zawbaa and S. Kamel, Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*, 8, 3727–3766, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ejypr.2022.02.300>.
- [12] P. Yang, G. Tang and A. Nehorai, A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (2), 884–892, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2207134>.
- [13] M. Yang, L. Zhang, Z. Zhao and L. Wang, Comprehensive benefits analysis of electric vehicle charging station integrated photovoltaic and energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 302, 1–12, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126967>.
- [14] B. Aljafari, P.R. Jeyaraj, A.C. Kathiresan and S.B. Thanikanti, Electric vehicle optimum charging-discharging scheduling with dynamic pricing employing multi agent deep neural network. *Computers and Electrical Engineering*, 105, 1–16, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108555>.
- [15] K. Victor Sam Moses Babu, K. Satya Surya Vinay and P. Chakraborty, Peer-to-Peer Sharing of Energy

- Storage Systems Under Net Metering and Time-of-Use Pricing. *IEEE Access*, 11, 3118–3128, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234625>.
- [16] M.A. Judge, A. Khan, A. Manzoor and H.A. Khattak, Overview of smart grid implementation: Frameworks, impact, performance and challenges. *Journal of Energy Storage*, 49, 1-18, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104056>.
- [17] J.H. Angelim and C. de M. Affonso, Probabilistic assessment of voltage quality on solar-powered electric vehicle charging station. *Electric Power Systems Research*, 189, 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106655>.
- [18] NASA Prediction of Worldwide Energy Resources, 2021. <https://data.nasa.gov/Earth-Science/Prediction-Of-Worldwide-Energy-Resources-POWER-/wn3p-qsan> (accessed Oct. 08, 2021).
- [19] M. Terkes, Z. Ozturk, A. Demirci and S.M. Tercan, Optimal sizing and feasibility analysis of second-life battery energy storage systems for community microgrids considering carbon reduction, *Journal of Cleaner Production*, 421, 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138507>.
- [20] Homer Energy, 2023. <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html> (accessed Jul. 10, 2023).
- [21] Z. Ozturk and A. Demirci, Optimization of Renewable Energy Hybrid Power Systems Under Different Penetration and Grid Tariffs. *Journal of Polytechnic*, 26(3), 1267-1275, 2023. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1246418>.
- [22] J.M. Clairand, M. Arriaga, C.A. Canizares and C. Alvarez-Bel, Power Generation Planning of Galapagos. Microgrid Considering Electric Vehicles and Induction Stoves. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10 (4), 1916–1926, 2019. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2876059>.
- [23] A. Chauhan and R.P. Saini, A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 99-120, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.079>.
- [24] Z. Ozturk, A. Demirci, S. Tosun and A. Ozturk, Technic and Economic Effects of Changes in the Location of Industrial Facilities in Industrializing Regions on Power Systems, in 2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 11–17, 2021. <https://doi.org/10.23919/ELECO54474.2021.9677827>.
- [25] Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, B. Shen and T. Long, A review of multi-energy hybrid power system for ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110081>.
- [26] I.R.E. Agency, IRENA (2021), *Renewable Power Generation Costs in 2020*, Abu Dhabi, 2020.
- [27] *Renewables 2021, Global Status Report*, 2021.
- [28] A. Demirci, Z. Ozturk and S. M. Tercan, Decision-making between hybrid renewable energy configurations and grid extension in rural areas for different climate zones. *Energy*, 1–22, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125402>.
- [29] Z. Ozturk, S. Tosun, A. Ozturk and O. Akar, Comparative Evaluation of Stand-Alone Hybrid Power System with Different Energy Storages. *Fresenius Environmental Bulletin*, 30(9), 10908–10924, 2021.
- [30] T. Salameh, M.A. Abdelkareem, A.G. Olabi, E.T. Sayed, M. Al-Chaderchi and H.Rezk, Integrated standalone hybrid solar PV, fuel cell and diesel generator power system for battery or supercapacitor storage systems in Khorfakkan, United Arab Emirates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (8), 6014–6027, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.153>.
- [31] C. Li, Y. Zeng, Z. Li, L. Zhang, L. Zhang, Y. Shan and Q. Tang, Techno-economic and environmental evaluation of grid-connected and off-grid hybrid intermittent power generation systems: A case study of a mild humid subtropical climate zone in China. *Energy*, 230, 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120728>.
- [32] S.M. Tercan, A. Demirci, E. Gokalp and U. Cali, Maximizing self-consumption rates and power quality towards two-stage evaluation for solar energy and shared energy storage empowered microgrids. *Journal of Energy Storage*, 51, 1-13, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104561>.
- [33] A. Demirci, O. Akar and Z. Ozturk, Technical-environmental-economic evaluation of biomass-based hybrid power system with energy storage for rural electrification. *Renewable Energy*, 195, 1202–1217, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.097>.
- [34] Trading Economics, Inflation Rate. <https://tradingeconomics.com/country-list/inflation-rate?continent=world> (accessed Feb. 03, 2022).
- [35] O. Ekren, C.H. Canbaz and Ç.B. Güvel, Sizing of a solar-wind hybrid electric vehicle charging station by using HOMER software. *Journal of Cleaner Production*, 279, 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123615>.



Appendix

COE (1): 14.0% IR, 23.31% DR, COE (2): 7.4% IR, 8.49% DR, COE (3): 1.3% IR, 4.3% DR.
(*) Optimal HPS

Table A.1. Morning Peak (With GSC)

PV (kW)	SCR (%)	SSR (%)	EE (%)	COE (\$/kWh)		
				COE (1)	COE (2)	COE (3)
0	100.0	0.00	0.00	0.106	0.106	0.106
120	97.0	18.0	0.54	0.092	0.097	0.099
240 (*)	79.0	30.0	7.10	0.084	0.094	0.098
300	71.0	33.0	11.9	0.082	0.095	0.098
360	64.0	36.0	16.8	0.081	0.096	0.100
420	58.0	38.0	21.5	0.079	0.097	0.103
480	53.0	40.0	25.9	0.079	0.099	0.105
540	49.0	42.0	29.9	0.079	0.102	0.108
600 (*)	45.0	43.0	33.6	0.080	0.104	0.111
660	43.0	44.0	37.0	0.080	0.107	0.115
720	40.0	45.0	40.2	0.081	0.109	0.118
780	38.0	46.0	45.9	0.082	0.112	0.122
840	36.0	47.0	46.7	0.083	0.115	0.125
900	34.0	48.0	47.5	0.084	0.118	0.129

Table A.2. Midday Peak (With GSC)

PV (kW)	SCR (%)	SSR (%)	EE (%)	COE (\$/kWh)		
				COE (1)	COE (2)	COE (3)
0	100.0	0.0	0.00	0.106	0.106	0.106
120	100.0	19.0	0.04	0.092	0.096	0.097
240	94.0	36.0	2.13	0.084	0.088	0.092
300 (*)	87.0	41.0	5.67	0.082	0.087	0.091
360	79.0	45.0	10.40	0.081	0.087	0.092
420	58.0	38.0	15.40	0.080	0.088	0.094
480	53.0	40.0	20.40	0.080	0.090	0.096
540 (*)	49.0	42.0	25.00	0.080	0.092	0.099
600	45.0	43.0	29.30	0.080	0.095	0.102
660	43.0	44.0	33.20	0.080	0.097	0.105
720	40.0	45.0	36.70	0.081	0.100	0.109
780	45.0	55.0	39.90	0.082	0.103	0.112
840	42.0	56.0	42.90	0.083	0.106	0.116
900	40.0	57.0	45.60	0.084	0.109	0.120

Table A.3. Evening Peak (With GSC)

PV (kW)	SCR (%)	SSR (%)	EE (%)	COE (\$/kWh)		
				COE (1)	COE (2)	COE (3)
0	100.0	0.0	0.00	0.106	0.106	0.106
120 (*)	90.0	17.0	1.87	0.098	0.103	0.105
240	68.0	26.0	10.50	0.092	0.092	0.106
300	60.0	29.0	15.60	0.091	0.087	0.108
360	54.0	31.0	20.40	0.090	0.081	0.110
420 (*)	58.0	38.0	25.00	0.090	0.077	0.113
480	53.0	40.0	29.10	0.090	0.074	0.115
540	49.0	42.0	32.90	0.090	0.072	0.119
600	45.0	43.0	36.50	0.091	0.071	0.122
660	43.0	44.0	39.70	0.092	0.071	0.125
720	40.0	45.0	42.60	0.092	0.071	0.129
780	32.0	39.0	45.30	0.093	0.071	0.133
840	30.0	40.0	47.80	0.094	0.072	0.136
900	28.0	40.0	50.10	0.095	0.073	0.140

Table A.4. Morning Peak (Without GSC)

PV (kW)	SCR (%)	SSR (%)	EE (%)	COE (\$/kWh)		
				COE (1)	COE (2)	COE (3)
0	100.0	0.0	0.00	0.106	0.106	0.106
120	97.0	18.0	0.00	0.091	0.097	0.099
240	79.0	30.0	0.00	0.075	0.086	0.089
300	71.0	33.0	0.00	0.067	0.080	0.084
360	64.0	36.0	0.00	0.060	0.075	0.079
420	57.0	38.0	0.00	0.053	0.070	0.075
480 (*)	53.0	40.0	0.00	0.047	0.065	0.071

540	48.0	42.0	0.00	0.042	0.061	0.067
600	43.0	44.0	0.00	0.038	0.058	0.064
660	42.5	44.0	0.00	0.034	0.054	0.061
720	39.8	45.0	0.00	0.030	0.051	0.058
780	37.5	46.0	0.00	0.027	0.049	0.055
840	35.5	47.0	0.00	0.024	0.046	0.053
900 (*)	33.7	48.0	0.00	0.021	0.044	0.051

Table A.5. Midday Peak (Without GSC)

PV (kW)	SCR (%)	SSR (%)	EE (%)	COE (\$/kWh)		
				COE (1)	COE (2)	COE (3)
0	100.0	0.0	0.0	0.106	0.106	0.106
120	100.0	19.0	0.0	0.090	0.096	0.097
240	94.0	36.0	0.0	0.074	0.086	0.089
300	87.0	41.0	0.0	0.067	0.081	0.085
360	79.0	45.0	0.0	0.059	0.075	0.080
420	71.0	47.0	0.0	0.052	0.070	0.075
480 (*)	65.0	49.0	0.0	0.046	0.065	0.071
540	60.0	51.0	0.0	0.041	0.061	0.067
600	55.0	52.0	0.0	0.036	0.057	0.065
660	51.0	53.0	0.0	0.032	0.054	0.063
720	48.0	54.0	0.0	0.028	0.051	0.062
780	45.0	55.0	0.0	0.025	0.048	0.062
840	42.0	56.0	0.0	0.022	0.045	0.062
900 (*)	40.0	57.0	0.0	0.019	0.043	0.062

Table A.6. Evening Peak (Without GSC)

PV (kW)	SCR (%)	SSR (%)	EE (%)	COE (\$/kWh)		
				COE (1)	COE (2)	COE (3)
0	100.0	0.0	0.00	0.106	0.106	0.106
120	90.0	17.0	0.02	0.095	0.101	0.103
240	68.0	26.0	0.07	0.078	0.089	0.092
300	60.0	29.0	0.11	0.070	0.083	0.087
360	54.0	31.0	0.36	0.063	0.077	0.081
420 (*)	49.0	32.0	1.04	0.056	0.072	0.077
480	45.0	34.0	2.55	0.051	0.068	0.073
540	41.0	35.0	4.60	0.046	0.064	0.069
600	38.0	36.0	6.97	0.041	0.060	0.066
660	36.0	37.0	9.63	0.037	0.057	0.063
720	34.0	38.0	12.3	0.033	0.054	0.060
780	32.0	39.0	15.0	0.030	0.051	0.058
840	30.0	40.0	17.5	0.027	0.049	0.055
900 (*)	28.0	40.0	20.1	0.024	0.047	0.053





The investigation of cutting parameters for improving cutting performance in band saw machines

Şerit testere tezgâhlarında kesme performansını iyileştirmek için kesme parametrelerinin incelenmesi

Seda Yıldız¹ , Gökhan Atal^{2,*} , Emrah Beker³ , Ulaş Birgül⁴ 

¹Baykar Technologies, 34488, İstanbul, Türkiye

²Sakarya University of Applied Sciences, Mechatronics Engineering Department, 54187, Sakarya, Türkiye

^{3,4}Sakarya University of Applied Sciences, Manufacturing Engineering Department, 54187, Sakarya, Türkiye

Abstract

Machine tools are required to be able to produce workpieces according to the desired technical requirements. The goal of machining is to achieve a high production volume of good quality with maximum tool life, short production time, and low cost. The surface properties obtained as a result of the changing and developing technology in cutting processes, the introduction to manufacturing, and especially the post-processing processes are of great importance. While the time obtained as a result of fast cuts has economic value, high-quality surface obtaining provides cost savings by minimizing the subsequent machining operations. Within the scope of the study, Ø120 mm ST-52 and Ø120 mm AISI 4140 materials have been cut with smart and automatic cutting modes by our domestic band saw machine. As a result of the cuts, the roughness values and curvatures of the samples have been checked with the surface roughness device and surface gauge. While the surface roughness after cutting was 4.45 µm with the automatic cutting mode, this value decreased by 16% to 3.71 µm with the smart cutting mode.

Keywords: Smart cutting, Surface roughness, Band saw machine, Cutting performance

1 Introduction

The band saw machines work on the rotation and feeding of the band sheet with the help of wheelers. To provide maximum cutting performance and tool life, tooth pitch and tooth geometry are among the most important parameters in band saws [1]. Today, machines using machining methods such as band saws are pioneers in the development of the global economy, especially in the automotive and aviation industry [2]. The goal of machining is to achieve a high production volume of good quality with maximum tool life, short production time, and low cost [3]. Studies involving sawing were first carried out on circular and band saws in the 1950s. In the 1960s, a cost comparison of cutting with the band saws and arm saws, and research on the cutting economy were made. The changes in specific cutting forces and the effects of cutting parameters such as cutting speed and feed on cutting forces were investigated in cutting

Öz

İş parçalarını istenilen teknik gereksinimlere göre üretebilmek için takım tezgahlarına ihtiyaç vardır. Talaşlı imalatta amaç, maksimum takım ömrü, kısa üretim süresi ve düşük maliyet ile kaliteli ve yüksek üretim hacmi elde etmektir. Kesme işlemlerinde değişen ve gelişen teknoloji sayesinde, imalata geçiş ve özellikle son işlemler sonucunda elde edilen yüzey özellikleri büyük önem taşımaktadır. Hızlı kesimler sonucunda elde edilen süre ekonomik değere sahipken, kaliteli yüzey elde edilmesi bir sonraki talaşlı imalat operasyonlarını minimuma indirerek maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Çalışma kapsamında yerli üretimimiz olan şerit testere makinası ile Ø120 mm ST-52 ve Ø120 mm AISI 4140 malzemeler akıllı ve otomatik kesim modları ile kesilmiştir. Kesimler sonucunda numunelerin pürüzlülük değerleri ve eğrilikleri yüzey pürüzlülük cihazı ve yüzey mastarı ile kontrol edilmiştir. Otomatik kesme modu ile kesim sonrası yüzey pürüzlülüğü 4.45 µm iken, akıllı kesme modu ile bu değer %16 azalarak 3.71 µm olarak tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Akıllı kesim, Yüzey pürüzlülüğü, Şerit testere makinası, Kesme performansı

various materials, taking into account the saw geometry in cutting in band saw. Ünüvar et al., in their study, determined that an increase in feed rate causes an increase in cutting forces [4]. Band saw is often preferred indifferent industries for cutting raw materials into customer orders due to its low notch loss, high metal removal rates, and competitive surface quality characteristics, it is frequently preferred in various industries for cutting raw materials into customer-ordered pieces. They observed that it led to a better understanding of cutting with a band saw by examining the effects [5]. The amount of sawdust removed by each tooth is not proportional to the load in sawing. Depth of cut cannot be selected for each tooth in saw cutting. Progress control; is carried out by the thrust load between the workpiece and the cutting insert. Tooth design, cutting speed, feed rate, and chip formation mechanism are the factors affecting cutting performance. The rotational movement of the band saw is achieved by driving the wheels by the electric motor. In the articulated

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gatali@subu.edu.tr (G. Atal)

Geliş / Received: 02.07.2023 Kabul / Accepted: 02.10.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1321748

band saw table, the part of the table called the head is articulated from one end to the main body. The head descends with a rotational movement around the joint, the cutting process takes place Ünüvar et al. investigated the effect of cutting parameters on tool wear in band saw and formed the tool life equation. Material hardness, feed rate, and cutting speed, respectively, have the greatest effect on wear; They observed that the particle sizes had the least effect [6]. Due to the lack of continuous cutting capability, it has been understood that the cutting process with a band saw has higher distortions and a smooth cutting surface compared to cutting with laser cutting, plasma cutting, and circular saw [7]. Yılmaz et al. The tool performance in the cutting process of AISI 1020 material with the flat saw, which has a wide usage area in the manufacturing industry, was investigated. A computer-controlled cutting machine was used in the experiments, and the feed and cutting speed was chosen as fixed parameters for the determination of the cutting performance of the saw. A total of 80 experiments were carried out and boron oil was used as the cooling liquid. Microcracks formed by the cutting process were visualized by scanning electron microscopy (SEM). With the start of the cutting process, the cutting forces increased rapidly and remained stable after a certain time. The largest forces are the F_x forces in the shear direction. With the increase of the F_x force, the tooth fracture dimensions are minimal [8]. Cheng et al. have studied some innovative design concepts and especially force-based smart cutting tools, temperature-based internal cooling cutting tools, and smart cutting tools [9]. Meng et al. With the finite element numerical simulation of Ansys/ls-dyna, the changes in stress, and shear force during the cutting of mulberry branches with a circular saw were analyzed. It provides a theoretical basis for optimizing circular saw blade parameters, and extending service life [10].

Sönmez and Söğütü studied the surface roughness and cutting parameters of acacia, pear, chestnut, sessile oak, and Cedrus libani woods cut in tangential and radial directions on a 250 mm diameter, 24- and 48-tooth circular saw. Rough-textured wood materials gave rougher surfaces than fine-textured ones. The roughness is higher in the radial direction. As a result of their studies, they suggested that the rough-textured wood materials should be cut by increasing the number of incisors [11]. In Ni, the transverse vibration of the band saw blade in the sawing operation is a well-known cause of band saw wear, material loss, and poor surface quality of the workpiece. Five types of surface textures with an inverted triangle structure on the band saw blade was developed for the saw to study their effects on transverse vibration. Developed surface texture on the band-saw blade to reduce transverse vibration for sawing [12]. Quintana and Ciurana review the research situation regarding the vibration problem and classifies existing methods developed to achieve stable cutting as those that are out-of-process or in-process, those that change the system passively or actively [13]. R. Okai et al., in their study, cut wood with a band saw with a random pitch. They present their experimental results showing the surface profile of the workpiece when cut with stellite-tipped saws and jigsaws under both laboratory and

industrial conditions [14]. Kremlava et al. showed that the eigenfrequencies of bending-torsion vibrations of band saw blades and the limits of active regions can be displayed as a function of tool parameters and operating conditions.. The width of the regions of instability depends on the excitation coefficient and is mainly determined by processing. By means of the analytical formulas obtained, the dynamic instability regions can be determined as a function of the relevant parameters [15]. Taylor and Thompson have obtained the band saw's wear rate and cutting speed the relationships between related parameters such as the machine load and the geometry of the workpiece. Wear rate and shear rate were expressed in terms of a shear constant that describes the penetration of teeth and their decay with use. They used a computer-based simulation of the band sawing process to investigate the effects of relevant engineering parameters on productivity and the cutting economy. It shows that when the thrust load, feed rate, and band saw cutting speed increase, the cutting speed reaches its maximum, the cutting cost decreases to a minimum, and the blade life decreases [16]. AISI 4140 tempered steel, which is one of the test materials, contains a high amount of carbon due to its alloy and therefore it is in a structure suitable for hardening. The ratio of Mn and Cr in its main component provides high strength and toughness. ST-52 refers to general structural carbon steel containing up to 2% carbon.

This material is suitable for use in welded steel constructions subject to variable and constant stresses. With this study, which was carried out in an industrial environment, the effects of artificial intelligence-machine learning on the process result in the machine manufacturing sector were examined and the improvement was numerically proven. In this study, Ø120-sized ST-52 and AISI 4140 materials were cut in smart and automatic cutting mode. ST-52 and AISI 4140 materials were cut in two different cutting modes, smart, and automatic cutting modes. As a result of the experimental studies, the cut curvature and surface roughness of the test samples were measured. The improvement in smart and automatic cutting modes is examined by taking the cutting times as a reference.

2 Materials and methods

In the study, the importance and advantages of production with adaptive control in the saw machine, which is less in number than the machine tools in the literature, are emphasized. The effect of variable cross-section and variable parameters on the cutting surface quality and cutting time was investigated during cutting in the sawing machine. This study, it is aimed to examine the cutting improvements of two different cutting modes in two different materials with the same diameter (Ø120mm), by taking the cutting time and cutting surface quality as a reference. The test materials used in the study were preferred because of the frequency of use in the industry and their different hardness scales. The chemical compositions of the materials used in the study are given in Table 1 and Table 2.

The Brinell hardness of the materials preferred to be cut within the scope of the study is given in Table 3.

Table 1. ST-52 Chemical composition (wt %)

C	Si	Mn	P	S	F
0.22	0.55	1.60	0.030	0.03	Balance

Table 2. AISI 4140 Chemical composition (wt %)

Cr	Mn	C	Si	Mo	S	P	Fe
0.8-1.10	0.75-1	0.380-0.430	0.15-0.30	0.15-0.25	0.040	0.035	Balance

Table 3. The hardness of the cut materials

Material	Hardness (Brinell HB)
ST-52	165
AISI 4140	197

The experiments were carried out in Kar Metal company, which produces band saw and circular saw machines, with the ULTRA 300x300 Full automatic band saw machine shown in Figure 1. Smart cutting technology stands out as one of the most important features of the machine. 13,000 materials classified according to 6 different standards have been saved in the machine's library. In addition, it has capabilities such as automatic selection of cutting parameters that are most suitable for cutting channels, material quality, heat treatment, sawing mode, blade type, and blade TPI according to predefined parameters in the database.






Figure 1. ULTRA 300x300 Fully automatic domestic band saw machine (Production of Kar Metal Company in Turkey)

In addition, in Table 4, the maximum cutting capacity of the ULTRA 300x300 Full automatic band saw machine is given with the geometry information. In this study, tests were carried out with a diameter Ø120 material cut in a circular geometry. In the study, a WIKUS/Marathon M42 model 54x1.6 bimetal hook tooth 2/3 tpi band saw was used. This saw has a hardness of 68-69 HRC.

In the cutting process performed with a WIKUS/Marathon brand bimetal bladed band saw which is made of bimetal materials such as alloy steels, high-speed steels and carbon steels, blade length is 7220mm, blade width is 54 mm, blade thickness is 1.6 mm, 2/3 saw tooth type and boron oil as cooling fluid were used Figure 2.

Table 4. Ultra 300x300 band saw machine cutting capacity

Material Geometry	Cut Angle (0°)
	300 mm
	300 mm
	300x330 mm

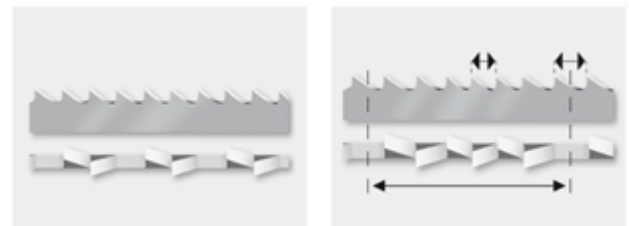


Figure 2. Marathon bi-metal band saw blade hook tooth 2/3 tpi

The cutting process can be followed instantly on the Karmetal Ultra 300x300 machine, which can perform high-performance fast cutting, the cutting operation of which is shown in Figure 3. The cutting speed can reach a maximum of 400m/min in the latest model band saw machine with the main engine power of 21kW. This band saw machine, which works with the latest technology, calculates the most suitable cutting parameters and cuts depending on the type and dimensions of the material to be cut.

For the smart mode, materials included were defined to the band saw machine, classified according to material properties, and the most appropriate parameters were taught to the machine with calculations. The material to be cut is prepared for the cutting process depending on parameters such as material geometry and heat treatment. In smart cutting mode, since the cross-sectional tracking of the part is performed, the strip speed and descent speed are updated in real-time thanks to the machine parameter software.

As a natural output of this information, it has been observed from the interface that the cutting process slows down when the diameter of the piece is reached during the cutting process. In the study, the most suitable cutting parameters were determined on the materials to be cut and these parameters were taught to the machine. Parameters; Cutting speed, Feed rate, Cooling lubricant, blade booth pitch. With the database prepared by the knife manufacturer,

the most appropriate parameters were added to the experimental setup. Thus, without the need for an operator, the most suitable parameters for the relevant material are called from the library and the cutting process is carried out. One of the important features of the smart cutting process is that the cutting parameters are recalculated depending on the strain during cutting. In addition, critical data during cutting is stored on a cloud server to be interpreted in artificial intelligence.

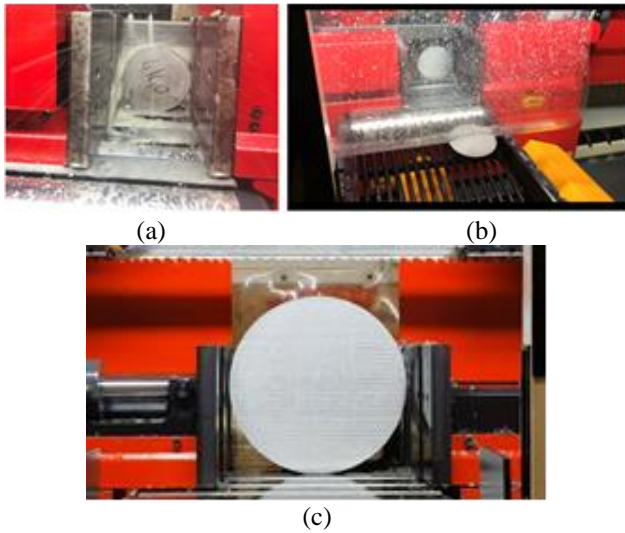


Figure 3. Cutting process (a) cutting moment (b) after cutting (c) before cutting



Figure 4. Operatorpanel interface (a) Smart cutting mode operator panel, (b) Automatic cutting mode operator panel

In the smart cutting mode (Figure 4a), the value seen when the active cross-section measures 120 is the value kept constant for the automatic cutting mode (Figure 4b). Figure 4a and Figure 4b show the digital display when in smart and automatic cutting modes. In smart cutting mode, cutting speeds change instantly. During cutting, the measurement in the part cross-section changes the saw rotation speed and the body stroke speed. When the section size decreases during cutting, the cutting speed increases as the amount of sawdust that the blade can remove will increase.

Since the instant cross-section of the part is monitored in smart cutting mode, the strip speed and descent speed are updated in real-time thanks to the machine parameter software. For example, when cutting a solid cylinder material, it cuts faster at the point where it starts but cuts slower when it reaches the middle of the material. The feed rate increases and decreases instantaneously depending on the material cross-section change. In the automatic cutting process, the widest length of the material to be cut is taken into account and the cutting and feed speeds are determined based on this section length.

In this study, the Mitutoyo brand Surftest SJ-210 model surface roughness measuring device was used. In order to maintain the precision in the measurement, control measurements specified on the calibration plate of the device were made at the end of every 100 measurements. After the device was adjusted to 2.5 mm measuring steps and 3 cut-offs, the measuring arm was placed between two lines with 17 mm spacing.

3 Results and discussion

After the study, the cutting times of the materials, the cut surface roughness values, and the curvature results of the test samples were examined with two different cutting modes. As seen in Table 5, It has been observed that the cutting speed slows down when the largest section of the piece is reached in the smart cutting mode and the speed increases as the section contraction, which has a positive effect on the cutting time in cutting the piece. In smart cutting mode, variable cutting speed and descent speed occur depending on the section change. This situation decreases the cutting time when it increases the speed when it comes to the narrow section during cutting. As the cross-section grows, the amount of sawdust removed from the part increases. This reduces the cutting speed and landing speed. As a result, the cutting time increases. According to the literature, the current study was conducted not to directly affect the calculation of blade life, but to see the improvement in cutting quality and improvements were observed [4,16].

Table 5. Cutting time results

Cutting Material	Mode/ Cutting Time(s)	
	Automatic	Smart
ST-52	189	184
AISI4140	170	173

While the active cross-section is at its lowest level, the feed rate is at its maximum. In this study, this value is 48.92 mm/min. With this result, it is seen that it directly affects the

cutting time. In automatic cutting mode, the cutting time is extended. When cutting ST-52 material with automatic mode, the time is longer by 7% compared to the smart cutting mode, and by 10% for AISI4140 material. Surface roughness values were taken from the samples in case the surface quality was compromised by saving time.

Surface roughness results are shown in Table 6. According to the results, it was observed that the surface quality increased with the reduction of the cutting time in the sample cutting made with the smart cutting mode. The fact that the measured surface roughness values are low indicates that the surface quality has increased. In the study, the vibration output during cutting can be reached in the results obtained with the surface roughness device. The determination of the region of instability was achieved by the surface roughness results taken from the cut sample. (Kremlava et al, 2016) One of the most widely used parameters is the mean of the average height difference for the average surface. It provides for stable results as the parameter is not significantly influenced by scratches, contamination, and measurement noise (Eq(1)).

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx \quad (1)$$

Table 6. Average surface roughness results

Material	Cutting Mode/Surface Roughness (Ra(μm))	
	Automatic	Smart
ST-52	4.519	4.45
AISI4140	4.11	3.71

In Table 7, the table in which the data is followed instantly during cutting, which is one of the machine features, is given. With data flow and instant monitoring, you can monitor the instantaneous section, cutting speed, feed speed, etc. A software system has been developed to monitor the features.

In Figure 5, the main motor and servo motor stresses for all cuts can be examined. As can be seen in the figure, the amount of current drawn from the servo motor for both materials in automatic cutting mode increases when it reaches a quarter of the cutting. The percentage of power drawn from the servo motor is measured by the software integrated into the machine. This shows that the current

drawn from the servo motor is the same in any section of the part in smart cutting mode, but the percentage of current is variable in automatic cutting mode.

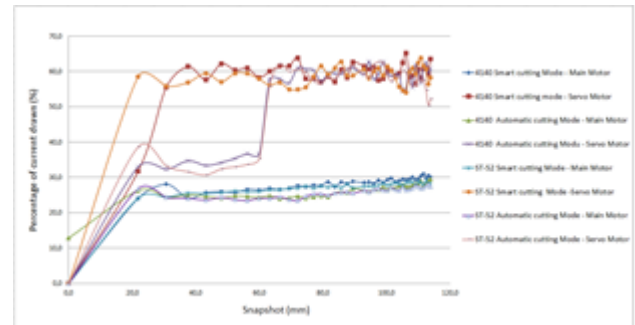


Figure 5. Main motor and servo motor stresses for all cuts

In the cut samples, the inclination of the piece was checked as perpendicular to the cutting direction and the cutting direction. With the help of the measuring device, the height (elevation) was measured differently, from the part cutting entrance part to the exit. In order to calibrate the measuring instrument before the measurements, Johnson measuring instrument was used, this process was carried out at room temperature, the reliability of the device was tested and measurements were taken from the samples after calibration Figure 6 (a), (b).



Figure 6. (a) Surface roughness device, (b) Sample skew check

The cutting direction of ST-52 and AISI 4140 materials and their inclination at the entrance and exit perpendicular to the cutting direction in smart and automatic cutting modes related to sample curvature are given in Figure 7.

Table 7. Data extraction

Sowblade Motor	Machine Body Motor		Saw blade Speed (Speed m/min)	Landing Speed			
	Absolut evalue (Servo Power) (%)	Servo Power(%)		Landing Speed (mm/min)	Cutting Type	Material Type	Active cross-section (mm)
Main Motor Power (%)							
24.12	58.5	-58.5	71	48.92	Smart	St 52-3	21.8
24.23	60.7	-60.7	71	48.92	Smart	St 52-3	21.8
23.63	56.1	-56.1	71	48.92	Smart	St 52-3	21.8
24.26	61	-61	71	48.92	Smart	St 52-3	21.8
24.40	55.8	-55.8	70	48.23	Smart	St 52-3	43.1

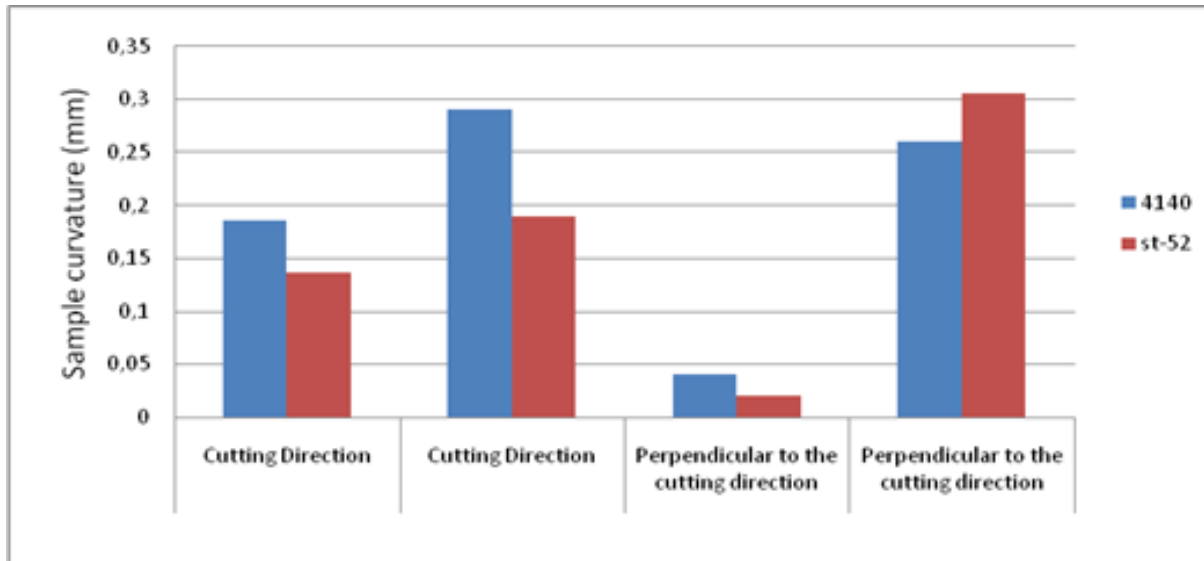


Figure 7. Sample curvature results

It is seen that this difference is much lower in the samples measured perpendicular to the cutting direction in the smart cutting mode compared to the other samples. It is known that the most influential parameters during cutting are cutting speed and landing speed, cutting tip (blade) material, and types [10]. Adaptive smart machining makes machining processes smart to a certain extent. It presents the concept and innovative use of adaptive smart machining through an adaptive control system with constraints, based on feed rate adjustment for orthogonal cutting force by a smart cutting tool developed in their work [17].

In his study, Sun presented an internally cooled cutting tool for dry cutting, along with other applications for adaptive machining purposes, as a temperature-sensing smart cutting tool in its own right. The cutting tool is characterized by a simple exchangeable internal cooling structure near the insert [18].

The adaptive control system is a system that provides machine optimization by detecting changes in the tool system. A good adaptive control system monitors the working status of the machine tool, while at the same time transmitting the changes in the system to the user and providing the system optimization itself. Sample curvature results are given in Table 8. It is seen that the highest value is the measurement taken from the cutting direction in the automatic cutting mode and the lowest value is the measurement taken perpendicular to the cutting direction in the smart cutting mode. These results proved that the sample curvature after cutting is lower in smart cutting mode. Smart cutting mode is provided by adaptive control. The machine works adaptively as there is a cross-section change during the cutting of cylindrical materials. Thanks to the variable section, an improvement in cutting time can be observed with variable cutting parameters.

According to Table 8, the cutting surface results obtained from the cuts made with the automatic cutting mode are rougher than the smart cutting mode. Since St 52 material is a softer material than 4140, it is an understandable result that

the surface quality of St 52 is worse than 4140. An inference can be made due to material hardness (Table 3).

Table 8. Sample curvature results

Material	Cutting Mode	The direction of measurement	Skew difference
ST-52	Smart	Cut direction	0.136
ST-52	Automatic	Cut direction	0.19
AISI 4140	Smart	Cut direction	0.186
AISI 4140	Automatic	Cut direction	0.29
ST-52	Smart	Perpendicular to the cutting direction	0.02
ST-52	Automatic	Perpendicular to the cutting direction	0.306
AISI 4140	Smart	Perpendicular to the cutting direction	0.04
AISI 4140	Automatic	Perpendicular to the cutting direction	0.26

4 Conclusions

Two different types of material (St-52 and AISI 4140) in Ø120 mm size have been cut with two different cutting modes (smart and automatic). As a result of the cuts, the roughness values of the samples were checked with the surface roughness device, and the curvature of the samples was cut with the help of a gauge. According to this;

- When the cuts made in two different modes are examined, it is seen that the cutting time is shorter in the smart cutting mode, as the cutting parameters change depending on the cross-section.

- When the surface roughness data is examined, the surface quality in cutting AISI 4140 material decreased by 16% in smart cutting mode compared to automatic cutting mode. In ST-52 material cutting, this rate is 9%. The curvature of the piece taken with the help of the gauge was examined and it was seen that the smart cutting mode cuts less curvature and better quality samples in both materials.

- It has been observed that the amount of current drawn from the servo motor during cutting is variable in automatic cutting mode. We can conclude that the reason for

this is that the smart cutting mode carries out active cross-section tracking so that the current is drawn.

• Compared to the literature, the increase in tool life and machine usage time has been associated with the use of cutting modes embedded in the machine. High surface quality and long working life are possible with the smart cutting mode that works with instantly variable parameters. It makes it easier to produce high-precision parts close to perfection, enabling more efficient production using adaptivity control. Damage of cutting inserts used in machine tools. Provides longer bench life by preventing.

Acknowledgment

The authors cordially thank the Kar Metal – SAWlutions and Sakarya University of Applied Sciences Robot Technologies and Intelligent Systems Application Research Center (ROTASAM), Turkey for supporting this work.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 16%

References

- [1] İ. Asiltürk ve A. Ünüvar, İmalatta yapay sinir ağlarının kullanılması. TMMOB Makina Mühendisleri Odası III. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, Türkiye, 16-17 Eylül 2005.
- [2] Y. Uğurlu, Takım tezgâhları ile imalatta iş güvenliği kurallarının ve uygulamalarının Türkiye genelinde incelenmesi ve irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çankaya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [3] O. Oral, Çok eksenli işleme merkezleri için akıllı takım sisteminin tasarımı ve kontrolü. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2013.
- [4] A. Ünüvar, H. Sağlam ve A. S. Ersoyoğlu, Şerit testere ile kesmede, kesme kuvveti modeli oluşturulması. 4th International Advanced Technologies Symposium, Konya, Türkiye, 28-30 Eylül 2005.
- [5] M. Sarwar, M. Persson, H. Hellbergh and J. Haider, Measurement of specific cutting energy for evaluating the efficiency of bandsawing different workpiece materials. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(12-13), 958-965, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.06.008>.
- [6] A. Ünüvar, H. Sağlam, A. S. Ersoyoğlu, Şerit testere ile kesmede, kesme parametrelerinin takım ömrüne etkisinin incelenmesi. TMMOB Makine Mühendisleri Odası III. Makine Tasarımı ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, Türkiye, 16-17 Eylül 2005.
- [7] E. Sarıaslan, Elektrik akımı kullanarak ısıtma ile testerede kesmede kesme parametrelerinin kesmeye etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [8] T. Yılmaz, İ. Uçun ve İ. Uçun, Lama testere ile AISI 1020 malzemesinin kesilmesi işleminde takım performansının incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14 (2), 11-18, 2014. <https://doi.org/10.5578/fmbd.7624>.
- [9] K. Cheng, Z. C. Niu and R. C. Wang, Smart cutting tools and smart machining: development approaches and their implementation and application perspectives. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 30, 1162-1176, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0183-4>.
- [10] Y. Meng, J. Wei, J. Wei, H. Chen and Y. Cui, An ANSYS/LS-DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system of mulberry cutting machine. Computers and Electronics in Agriculture, 157, 38-48, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.034>.
- [11] A. Sönmez ve C. Söğütü, Biçme işleminde kesiş yönü ve daire testere diş sayısının ağaç malzeme yüzey pürüzlülüğüne etkisi. Politeknik Dergisi, 12 (1), 55-60, 2009.
- [12] J. Ni, J. Lang and C. Wu, Effect of surface texture on the transverse vibration for sawing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92, 4543-4551, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0486-8>.
- [13] G. Quintana and J. Ciurana, Chatter in machining processes: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51 (5), 363-376, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.01.001>.
- [14] R. Okai, C. Tanaka, Y. Iwasaki and T. Ohtani, Application of a novel technique for band sawing using a tip-inserted saw regarding surface profiles. Holz als Roh- und Werkstoff, 63, 256-265, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0023-6>.
- [15] L. V. Kremleva, V. I. Malygin and N. V. Lobanov, Dynamic stability of band saw machines. Russian Engineering Research, 36 (9), 735-740, 2016. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16090100>.
- [16] R. W. Taylor and P. J. Thompson, Study of bandsaw blade wear and its effects on cutting rates and economics. Proceedings of the Seventeenth International Machine Tool Design and Research Conference, 133-140, 1977. https://doi.org/10.1007/978-1-349-81484-8_16.
- [17] C. Wang, S. B. C. Ghani, K. Cheng and R. Rakowski, Adaptive smart machining based on using constant cutting force and a smart cutting tool. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227 (2), 249-253, 2013. <https://doi.org/10.1177/0954405412466233>.
- [18] X. Sun, R. Bateman, K. Cheng and C. S. Ghani, Design and analysis of an internally cooled smart cutting tool for dry cutting. School of Engineering and Design, Brunel University, Uxbridge, UK, 2011. <https://doi.org/10.1177/0954405411424670>.





The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads

Dinamik yüklerin etkisi altında abrasiv aşınma gösteren beko-loder kova tırnaklarının çalışma ömürlerinin belirlenmesi

Menderes Kalkat^{1,*} , Mehmet Bahadır² , Furkan Yılmaz³ 

¹ Niğde Ömer Halisdemir University, Mechanical Engineering Department, 51240, Niğde Türkiye

² Selçuk University, Çumra Vocational School Department of Crop and Animal Production, 42500, Konya, Türkiye

³ Ankara Technology Development Zone, University District. 1606 th Street. No: 11, CYBERPARK H Blok Ericsson 06800 Bilkent, Ankara, Türkiye

Abstract

Especially in developing countries, the rise of infrastructure works increases the demand for heavy machines. Backhoe loaders: These are small tonnage work machines consisting of a bucket group at the front and a bucket set at the back, which are used in many areas such as infrastructure, road construction, maintenance, and repair in the construction industry. The teeth, which are bolted or welded to the front of the buckets, protect the bucket against the abrasive effects of soil and rocks. The rapid wear of the teeth under great loads is an important cost item in construction equipment. In this study, the stresses under the effect of dynamic loads were tried to be determined in the teeth in the backhoe loader buckets. In this context, it is aimed to determine the wear conditions of two different models of teeth, which are frequently used in the sector, with the help of the discrete element and finite element methods.

Keywords: Backhoe-loader, Tooth, Wear, Discrete element method (DEM), Lifetime

1 Introduction

In developing countries such as ours, the increase in infrastructure investments raises the importance and demand for heavy equipment. Heavy equipment is self-propelled or towable machines, tracked or wheeled, used in the superstructure, infrastructure, highway construction, maintenance, and repair in the construction sector, as well as in similar works such as excavation, loading, and spreading of soil in the mining and agricultural sector. Backhoe loaders can also be called backhoe loader tractors (Figure 1). They consist of a bucket group at the front and backhoe attachments at the rear. They are generally used in small demolition and excavation works, low tonnage loading, digging, and trenching works, crushing, and trenching works.

Among the operating costs of all construction equipment, fuel costs are the most common expense. At the same time, operator and attachment costs constitute the next expense item. These costs also apply to backhoe loaders. When attachment costs are considered, the most prominent parts are the teeth, which are bolted or welded to the front of the

Özet

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde altyapı çalışmalarının ön plana çıkması, iş makinelerine olan talebi arttırmaktadır. Beko loderler; inşaat sektöründe, altyapı, yol yapımı, bakım ve onarım gibi birçok alanda kullanılan ön tarafta kova grubu, arka tarafta kepçe grubundan oluşan küçük tonajlı iş makineleridir. Kovaların ön kısmına cıvatalı veya kaynaklı olarak monte edilen dişler, toprak ve kayaların aşındırıcı etkilerine karşı kovayı korurlar. Büyük yükler altında dişlerin çok çabuk şekilde aşınması iş makinelerinde önemli bir masraf gideri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, beko-loader kovalarındaki dişlerde, dinamik yüklerin etkisi altında gerilmeler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda sektörde sık kullanılan iki farklı model dişin, ayrık eleman ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla aşınma durumlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Beko loder, Diş, Aşınma, Ayrık elemanlar metodu (DEM), Ömür

buckets, preventing the bucket from easily deforming due to the abrasive effects of soil and rocks in different terrain conditions.



Figure 1. Backhoe loader

Teeth are parts subject to high rates of wear under heavy loads. The strength and efficient use of the tines is very important. Teeth are mounted according to the tonnage and bucket capacity of backhoe loaders. They are usually made of hot cast iron and reinforced with different features such as heat treatment or coating. If the design patterns and wear characteristics of the teeth are not aerodynamically

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mkalkat@nigde.edu.tr (M. Kalkat)

Geliş / Received: 08.07.2023 Kabul / Accepted: 31.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1324598

appropriate, the forces on the teeth with the effect of dynamic loads force the bucket and thus the backhoe-loader. This increases fuel consumption by operating inefficiently.

The scope of this study is to determine the stresses occurring under dynamic loads in backhoe loaders, which are used in many places such as construction and agriculture. Additionally, the study will examine the wear on the teeth of three different models that are used in buckets with a capacity of 1 m³, which is the most frequently used capacity in the sector. The study will employ the discrete element method.

2 Material and methods

This study was carried out with a 66 KW, 8760 kg standard tire-wheeled backhoe loader, with a front loader lift breakout force of 54 KN and a slope breakout force of 60.48 KN (Figure 2).



Figure 2. Backhoe loader and working environment taken as reference in the analysis

The width of the front loader bucket, which will be analyzed, and where the teeth are mounted with a bolt connection, is 2240 mm. The capacity is 0.96 m³. The bucket is made of Hardox 450 material, and the drawings of the bucket are given in Figure 3.

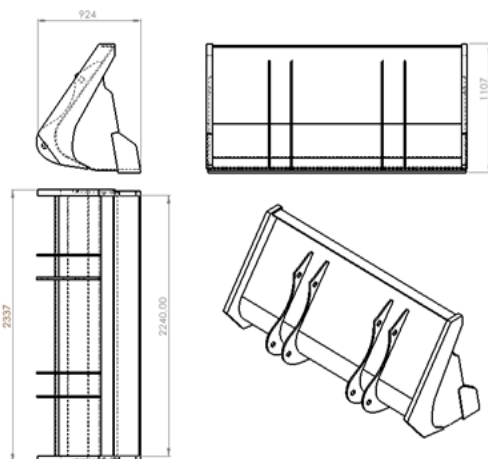


Figure 3. Technical dimensions of the bucket

The selection of teeth to be analyzed was made by considering the most frequently used models in the sector. The models were then drawn by taking the measurements of teeth from two different models that were obtained from companies selling construction machinery and equipment (Figure 4).

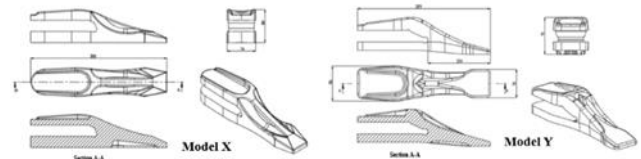


Figure 4. Technical drawings of two different models X and Y teeth used in the analysis

The chemical and mechanical properties of the teeth of the two different models are given in Table 1 and Table 2.

Table 1. Chemical properties of the teeth (Metalon steel casting company)

% C	% Si	% M	% P	% S	% Cr	% Ni	% V	% B
0.27	0.25	1.2	0.014	0.016	0.2	0.8	0.009	0.004

Table 2. Mechanical properties of teeth (Metalon Steel Casting Company)

Mass density (Kg/m ³)	Minimum yield strength (MPa)	Minimum tensile strength (MPa)	Extension (%)	Impact resistance (C ve KVJ)	Hardness (HV)
7.850	1.250	1.600	8	-40.20	500

The hardness values of the teeth are HV 500. The wear coefficient of the martempered AISI 4140 material, which has a hardness value of approximately 430 to 463 HV, was given as 2.78×10^{-5} mm³/Nm in the master's thesis study conducted by Gencer [1] in 2020. This value was taken as a reference in the analysis.

To match the simulations with reality, a pool (8 m long, 4 m wide, and 4 m high) of the heap pools in the crusher quarries was modeled. As a reference for the analysis, the filling and unloading process for a backhoe loader in the crusher quarry was recorded on video, and so that the filling and unloading times were determined. Based on the recorded videos, the bucket motion simulation was simulated, and the analysis process was applied for each different model tooth. To calculate the average diameter of the bulk materials used in the analysis, fifty granular gravel materials of different sizes were taken from the crusher quarry (Figure 5). The width, length, and height of the samples were measured, and the average diameter value was calculated as 35.22 mm. The Rocky DEM program, which is a Discrete Element Method (DEM) software, was used to determine the dynamic loads and wears of three different models of teeth under mechanical stresses.

The discrete element method is a numerical modeling method based on the standards of Newton's second law of motion and force-displacement laws. This method involves monitoring particle interactions at each contact and modeling particle motion for each particle (Boac et al., 2014 [2]). This model generates particles with physical and mechanical properties of the material depending on the information parameters given to the model. The basic principles of the discrete element method are to update the position of each

element in the simulation based on the interactions between the elements during the simulation time.



Figure 5. Dimensional properties of the mucus materials taken as samples

Figure 6 shows the main concept of the computational cycle for the discrete element method.

The study aims to develop an algorithm for detecting and measuring the contact forces between particles in a granular material. The objective of the research is to create a method for detecting and quantifying the contact forces among particles in a granular substance through an algorithm. The primary goal of this study is to establish an algorithm that can accurately detect and measure contact forces between particles within a granular material.

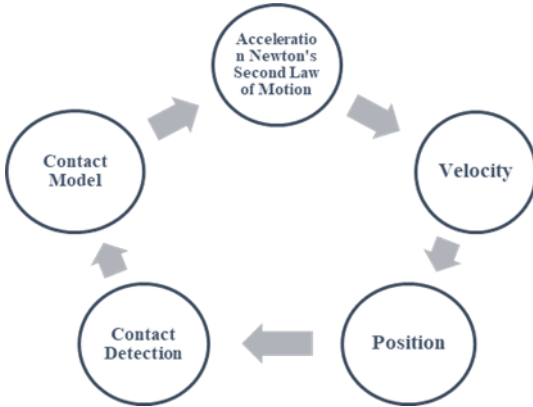


Figure 6. Computational cycle of the discrete element method (Yılmaz, F., 2021 [3])

2.1 Wear model

Archard's law of wear proves that the wear rate is proportional to the sliding velocity and normal contact force. In other words, the wear of a material is determined by the size, velocity, friction coefficients, and collision energy of the impacting particles (Wang et al., 2021 [4]). As a result, the volume loss of the material is associated with the work done by the frictional forces on the material's surface and can be expressed as Equation (1):

$$V = k \frac{F_{\tau} \cdot S_{\tau}}{H} \quad (1)$$

V : Total volume of material worn from the surface (mm^3),
 F_{τ} : The tangential force applied to the surface (N),
 S_{τ} : The sliding distance on the surface (mm),
 H : The hardness of the material exposed to wear (MPa),
 k : It is a dimensionless empirical constant

2.2 Literature review

One of the studies related to the teeth of construction machinery was conducted by Bahadır M. and Tekeli M. [5] in 2018. In their study, they designed a new tooth model pattern for a 10-ton excavator loader bucket using computer-aided design and manufactured it after conducting analyses using the finite element method. They determined the field performance of the newly designed tooth and observed the wear conditions on the teeth after 300 hours of operation.

The thesis study conducted by Yılmaz F. [3] in 2023 aims to determine the wear, fatigue, and working life of teeth used in 1 m^3 capacity buckets under dynamic loads in backhoe loaders. In this study, tooth wear was analyzed using the discrete element method, and the work life of the teeth was determined using the finite element method. The results of the study revealed that the majority of wear on the teeth occurs around sharp edges and small contact areas.

In his thesis study conducted by Öz S. [6] in 2022, the effects of dynamic loads on backhoe loader digging teeth were determined on three different types of soils and three different tooth groups using the finite element method. The study aimed to analyze the stresses and deformations on the teeth caused by dynamic loads.

In the study conducted by Özdoğan M. [7] in 2003, it was determined that the purpose of attaching bucket teeth is to enhance the bucket's ability to penetrate rock or loosened rock. It was found that in order to increase the digging force of the bucket, teeth with smaller cutting widths should be used. However, if such a problem does not exist, it is recommended to prefer wider and longer-lasting teeth for extended wear life.

In the study conducted by Kalpak S. et al. [8] in 2015, it was found that the maximum stress on the teeth occurs due to maximum contact, and they determined that it is possible to avoid this stress by redesigning the bucket tooth.

In the study conducted by Khan S. et al. [9] in 2015, it was observed that bucket teeth are subjected to abrasive wear due to the abrasive nature of soil particles. As a result, the study concluded that this condition reduces the working life of excavator bucket teeth to 72-120 working hours.

In the study conducted by Suryo S. H. et al. [10] in 2020, the aim was to optimize a commonly used bucket tooth design in the industry to achieve a lighter design that could provide nearly the same durability as the original tooth. Various tests, such as tensile testing, chemical composition testing, and micrographic testing, were conducted to determine the type of material used. Subsequently, a linear static simulation was performed to determine whether the design could be achieved through topology optimization. Based on the results of the linear static simulation conducted using the finite element method, the maximum value of Von-Mises stress was observed to be 653.17 MPa. This value was found to be below the yield strength of AISI 4140 material,

which is 1528 MPa, indicating that the design is safe and can be optimized to a certain extent.

In their study conducted in 1993, V. A. Polovinko and A. I. Fedulov [11] examined the wear on the teeth used in KG-5, KG-12, and KG-15 excavators for mining operations in the northeastern regions of Russia. They stated that the tooth wear obtained at the critical wear stage did not have any impact on the excavator's performance. The main features and dimensions of the tooth were developed based on the fundamental characteristic points of the wear resistance curves of the mass-produced wedge-shaped teeth. They emphasized that improving the design parameters of the tooth by bypassing the critical wear stage is an effective way to increase the wear resistance of the excavator tooth. They achieved a 40% improvement in wear resistance with their newly designed tooth.

In their study, Vlastimil Moní, Petr Klouda, Tomáš Miletí, František Helebrant, Luboš Donát, Jan Blata, and Michal Řehoř (2019) [12] emphasized the importance of excavator bucket teeth that directly interact with the extracted rock in mines and their geometries. Through their study, conducted under the TH03020368 project number of the TAČR EPSILON program, they aimed to extend the working life of excavator cutting bodies. With their research on tooth number 2673 and ESCO Super V39VYH, they aimed to discover the optimal tooth shape and geometry for different mining conditions.

In their study, Virag and Szirbig S. [13] (2012) investigated the effects of lateral forces on bucket teeth during the operation of excavators, backhoe loaders, and similar construction machinery. Through finite element analysis, they obtained the stress and displacement distribution in the teeth. The analysis revealed that as the lateral forces increased, the maximum stresses decreased.

In their study, Marko Popović, Ivan Milićević, Goran Marković, Milan Marjanović, and Vojislav Vujičić [14] (2020) used Evans' two-dimensional model to calculate the stresses that would occur in the ERS 1000 tracked excavator tooth under the existing excavation conditions in the Tamnava West Open-Pit Mine in Serbia. This model is a simple rock-breaking model used to obtain initial data for tooth design by subjecting the excavator to different forces. The maximum static load calculation for the tooth is based on data obtained from laboratory tests. The analysis consists of two stages. In the first stage, a laboratory test was conducted, which involved loading the tooth until it fractured, and the resulting forces and strains were monitored. The external load direction and movement were designed to mimic real field conditions, while the load intensity was increased until the cutting tooth fractured. In the second stage, considering the laboratory test conditions, the maximum force generated before the physical prototype fractured was measured. By comparing the results obtained from these two stages, the validation of the calculation model was ensured, and at the same time, the maximum static force that the tooth can withstand before fracturing was measured.

In their study, Zhigui Ren, Haoran Sun, Yongyong Liang, Yayin He, and Minghao Feng [15] (2020) discussed that the excavator bucket suffers damage before reaching its

theoretical lifespan during the excavation process. Based on the theory of continuous orbit, a three-segment continuous orbit was selected, in which the bucket and the arm alternately excavate in the normal excavation orbit. They analyzed the strength of the bucket structure under two different excavation force loads by calculating the Theoretical Digging Force (TDF) and Limit Digging Force (LDF) on the excavation orbit. They compared the strength results with the results of the bucket's constrained mode and free mode analyses. The three-dimensional model created for the analysis consisted of 226,572 elements and 419,837 nodes. When applying the load to the bucket, the maximum tangential force of the TDF and the maximum LDF for each orbit are taken as external loads. To prevent excessive calculation errors caused by stress concentration, the concentrated force is distributed to multiple nodes. According to the simulation results, it was observed that the bucket's stress and deformation were in the same position when subjected to the external loads of TDF and LDF, respectively. It can be observed that the ear plate and the rear support plate of the bucket are subjected to the highest stress at the welding location. As a result, considering the normal force and resistance moment in the selected normal excavation orbit, it is generally shown that the LDF is larger than the TDF and that the effect of the LDF load on the bucket structure strength is also greater.

2.3 Wear analysis

In simulations, the average equivalent diameter of bulk materials is assumed to be 35 mm. The particle sizes are randomly generated by the Rocky DEM program within a range of 0.75 to 1.5 times their actual size to achieve realism. The discrete element behavior model used for the analyzed teeth consists of the Hysteretic Linear Spring model for normal force, the Linear Spring Coulomb limit model for tangential force, and a rolling resistance coefficient of 0.18. The Archard wear model is employed for the wear analysis. In the discrete element method, the mesh sizes for all the teeth mounted on the bucket are set to 5 mm to ensure accurate detection of the analysis. Before starting the analysis, the angle of repose of the sample gravel materials was applied in the simulation environment in terms of accuracy and the closest to the reality of the results, so that the Rocky DEM program was also calibrated.

The other parameters used in the discrete element method simulation are obtained from existing literature sources. These parameters are based on data and findings reported in the relevant literature.

The mechanical properties of the rock particles (gravels) used in the simulations are provided in Table 3.

The analysis was applied to each bucket tooth group in the same manner and for the same duration. The total duration between the start and end of the bucket movement is 8 seconds, and it was repeated three times. The total analysis time, including the idle movement of the bucket, is 45 seconds (Figure 7).

Table 3. Mechanical properties of rock particles (Gravel)

Particle properties (Gravel)	
Density (kg/m ³)	2666.67
Bulk density (kg/m ³)	1600
Elastic modulus (N/m ²)	1E+08
Poisson's ratio	0.3
Equivalent sphere diameter (mm)	35
Coefficient of rolling resistance	0.18
Static friction coefficient (gravel-gravel)	0.8
Dynamic friction coefficient (gravel-gravel)	0.72
Coefficient of restitution (gravel-gravel)	0.3
Static friction coefficient (cast steel-gravel)	0.7
Dynamic friction coefficient (cast steel-gravel)	0.65
Coefficient of restitution (cast steel-gravel)	0.3

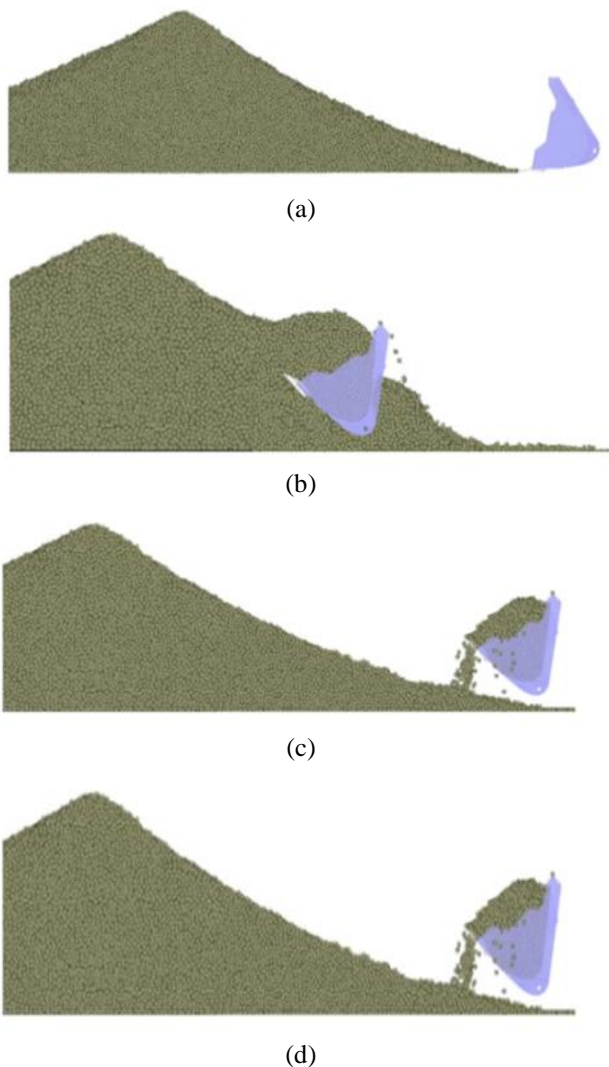


Figure 7. Three - repetition bucket movement simulation (a: bucket position in 3 seconds, b: bucket position in 6.3 seconds, c: bucket position in 8.3 seconds, d: bucket position in 11 seconds)

3 Results and discussions

3.1 Wear analysis and values for model X teeth

A wear analysis was conducted for Model X teeth, and the wear regions (Figure 8a) and wear amounts (Figure 8b) for all teeth attached to the bucket were determined through DEM analysis for Model X. The wear amounts of the three most heavily worn teeth were visualized and depicted in the figures.

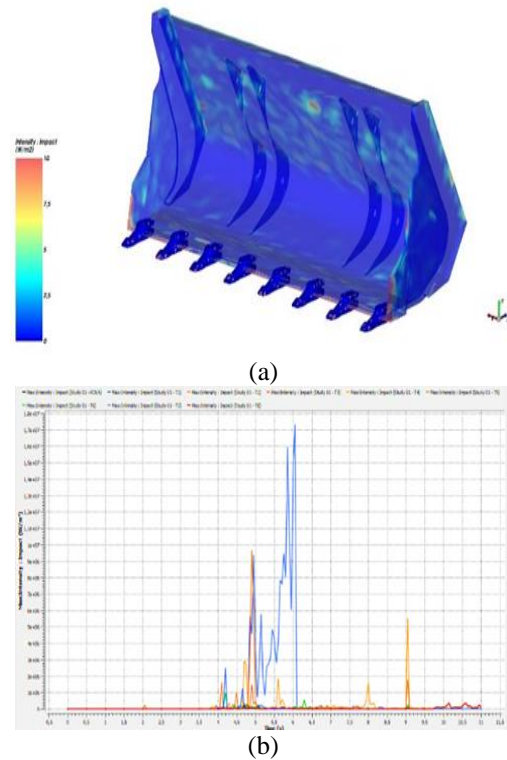


Figure 8. (a):wear regions on the bucket and model X teeth and (b):wear values on the bucket and model X teeth

In Table 4, the maximum wear amounts of all X model teeth are displayed.

Table 4. Maximum wear amounts of all model X teeth

Model X teeth	BUC KET	T1	T2	T3	T4
Maximum wear amount (W/m ²)	2.76E+05	1.73E+07	1.64E+06	1.49E+06	5.50E+06
Model X teeth	T5	T6	T7	T8	
Maximum wear amount (W/m ²)	9.67E+06	1.01E+06	2.50E+06	3.63E+05	

The mass loss amounts in the three teeth where wear is most common are given in Table 5 at the end of the analysis period. In Figure 9, wear regions observed on T1, T5, and T4 teeth during moments of maximum wear are displayed.

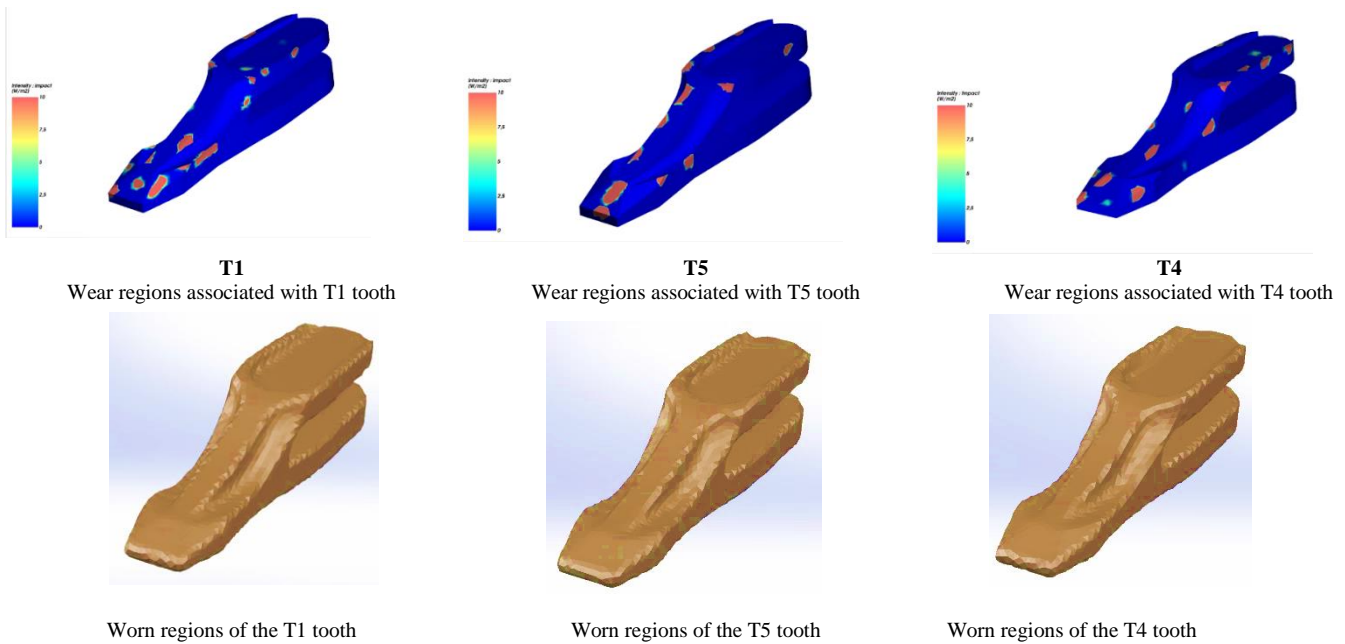


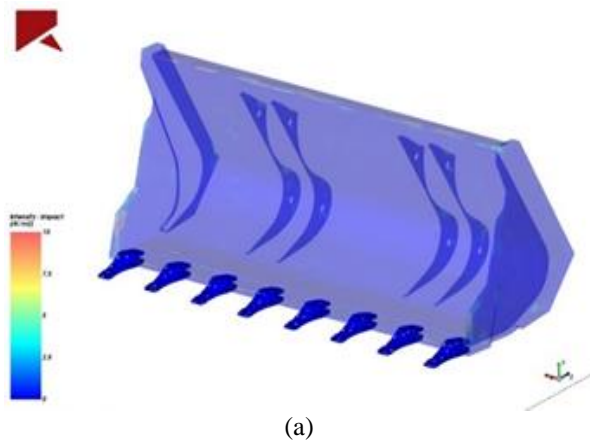
Figure 9. Wear regions observed on T1, T5 and T4 teeth during the moments of maximum wear.

Table 5. Mass loss observed on these teeth at the end of the analysis period.

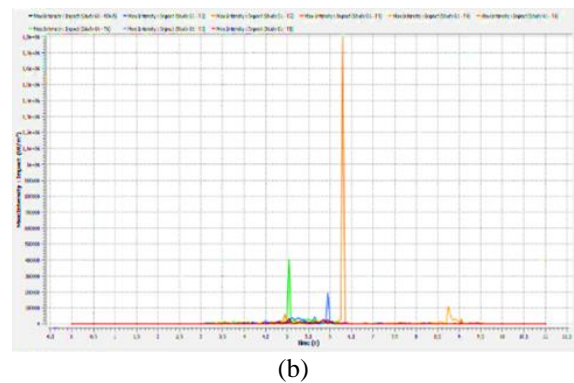
Mass losses in T1, T5 and T4 threads	Teeth with the most severe wear	T1	T5	T4
	Pre-experimental tooth volume (mm^3)	319.293,01		
	Pre-experimental tooth mass (kg)	2.506		
	Post-experimental tooth volume (mm^3)	314.417,83	314.425,47	314.907,00
	Post-experimental tooth mass (kg)	2,46818	2,46824	2,47202
	Wear amount in one hour (kg)	~3,01803.	~3,02075.	~2,71160.
		10-3	10-3	10-3

3.2 Wear analysis and values for model Y teeth

A wear analysis was conducted for Model Y teeth, and the wear regions (Figure 10a) and wear amounts (Figure 10b) for all teeth attached to the bucket were determined through DEM analysis for Model Y



(a)



(b)

Figure 10. (a):wear regions on the bucket and model Y teeth and (b):wear values on the bucket and model Y teeth

As can be seen from Table 6 and Figure 10, the wear is predominantly observed on the T2 tooth, followed by T6 and T1 teeth (Figure 11)

The mass loss amounts and ratios in the three teeth where wear is most common are given in Table 7 at the end of the analysis period.

Table 6. Maximum wear amounts of all model Y teeth

Model Y teeth	BUCKET	T1	T2	T3	T4
Maximum wear amount (W/m^2)	1,19E+04	1,94E+05	1,80E+06	1,43E+04	1,10E+05
Model X teeth	T5	T6	T7	T8	
Maximum wear amount (W/m^2)	3,98E+04	4,03E+05	3,62E+04	3,11E+04	

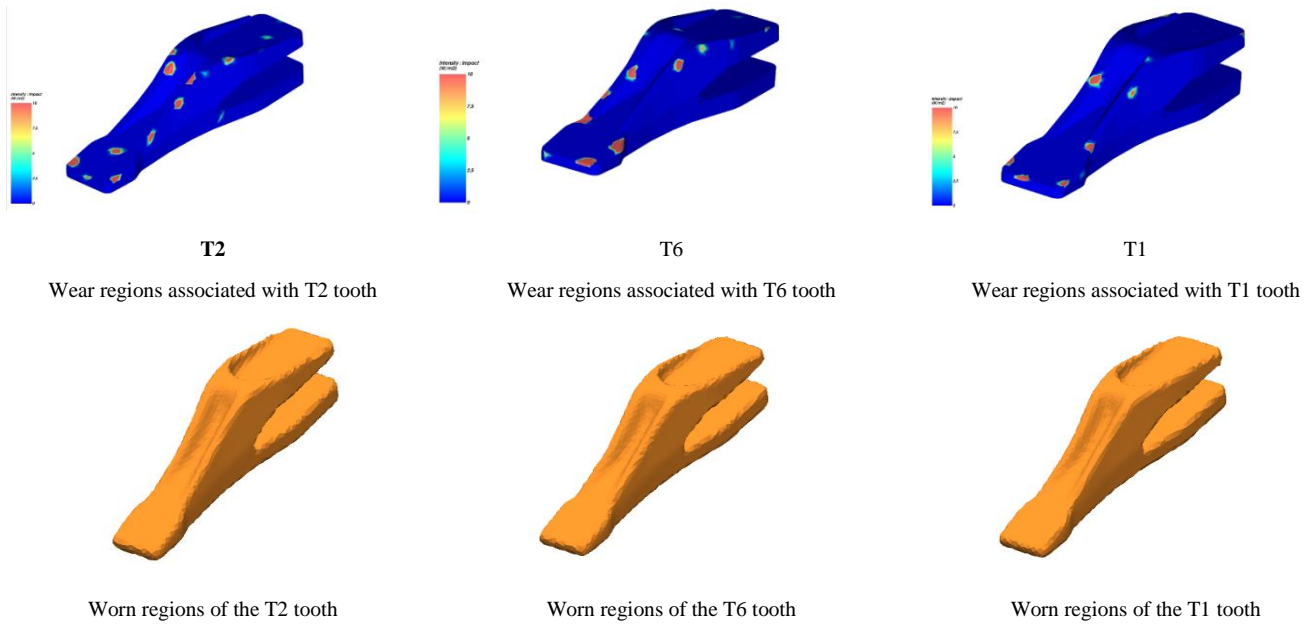


Figure 11. Wear Regions observed on T2, T6 and T1 teeth during the moments of highest stress.

Table 7. Mass loss observed on these teeth at the end of the analysis period

Mass losses in T2, T6 and T1 threads	Teeth with the most severe wear	T1	T5	T4
	Pre-experimental tooth volume (mm ³)	325.460,45		
Pre-experimental tooth mass (kg)	2,5548			
Post-experimental tooth volume (mm ³)	323.	323.	322.	
Post-experimental tooth mass (kg)	105,49	098,27	896,82	
Wear amount in one hour (kg)	2,24	2,53	2,53	
	606	632	474	
	~	~	~	
	2,4699.	2,4613.	2,4539.	
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	



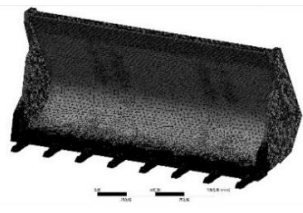
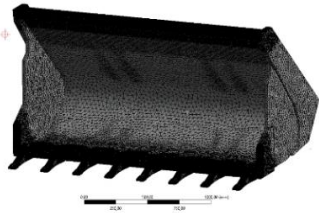
3.3 Fatigue and working life analysis

In our study, wear analyses were conducted on two different models of teeth under dynamic loads to determine the fatigue and working life durations resulting from wear effects. The stress and deformation values were determined on the three most worn teeth.

The node and element numbers for each model of tooth, selected for analysis using ANSYS Workbench 2020 R2 software, are presented in Table 8. Mesh quality standards for the teeth were adjusted to acceptable limits according to Skewness, Orthogonal, and Aspect Ratio criteria. Finite element analyses were then performed to determine the fatigue and working life analyses of the teeth.

According to the Gerber approach used in fatigue analysis of ductile materials (Ovalı, 2018 [16]), fatigue and working life analyses were performed on the top 3 most worn teeth for both models. The analysis determined the fatigue strength and working life values for these teeth. (Figure 12)

Table 8. Mesh quality values for two different models of teeth

	Model X	Model Y		
				
				
Number of nodes	2.807.784	1.964.873	Number of nodes	4.080.532
Number of elements	2.807.784	1.964.873	Number of elements	2.820.981
	0,87125	0,87282	Skewness Quality values (max.)	
	0,18875	0,18718	Orthogonal Quality values (min.)	
	9,887	9,71142	Aspect Ratio Quality values (max.)	

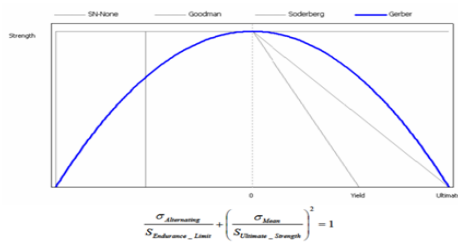
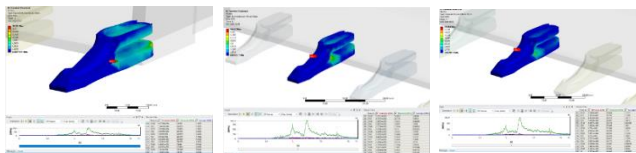


Figure 12. Gerber approach (bader Q. and kadum E., 2014 [17])

The determination of the working life of model X tooth: The stresses and working lives of the T1, T5, and T4 teeth at the time of maximum wear, where wear is most pronounced, have been observed (Table 9).

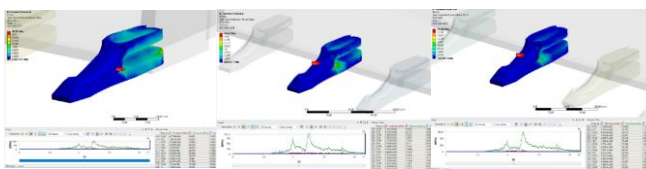
Table 9. Stresses and working lives of T1, T5 and T4 teeth at the time of maximum wear.



T1	T5	T4
Maximum equivalent stress at 6.35 seconds, where wear is highest 396.4 MPa	Maximum equivalent stress at 4.95 seconds, where wear is highest 206.12 MPa	Maximum equivalent stress at 9.05 seconds, where wear is highest 219.31 MPa
Working life (cycle) at 6.35 seconds, where wear is highest 2780.6	Working life (cycle) at 4.95 seconds, where wear is highest 18389	Working life (cycle) at 9.05 seconds, where wear is highest 22951

The determination of the working life of model Y tooth: The stresses and working lives of the T2, T6, and T1 teeth at the time of maximum wear, where wear is most pronounced, have been observed. (Table 10)

Table 10. Stresses and working lives of T2, T6 and T1 teeth at the time of maximum wear.



T1	T5	T4
Maximum equivalent stress at 6.3 seconds, where wear is highest 474.22 MPa	Maximum equivalent stress at 5.05 seconds, where wear is highest 96.042 MPa	Maximum equivalent stress at 5.95 seconds, where wear is highest 203.54 MPa
Working life (cycle) at 6.3 seconds, where wear is highest 5241.1	Working life (cycle) at 4.95 seconds, where wear is highest 1.10 ⁶	Working life (cycle) at 9.05 seconds, where wear is highest 2.87.10 ⁵

4 Conclusions

In this study, the results regarding the wear condition of the teeth were obtained using the Rocky DEM software, while the determination of fatigue and working life was performed using the ANSYS software.

During the wear analysis, as can be observed from the figures, the predominant result applicable to all teeth is that the majority of wear occurs around sharp edges and small contact areas, Figure 13.

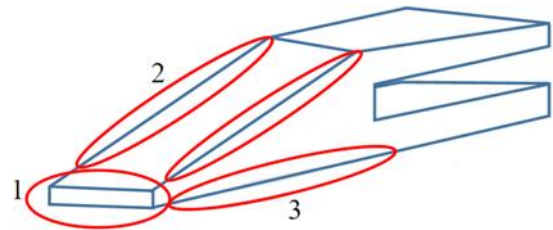


Figure 13. Total wear zones

The sides of the X-model tooth were thin compared to the other model tooth, so the wear effect was seen more on the side parts. In the Y-model tooth group, although the side walls are strong, it has been observed that the middle and upper parts wear out more quickly.

According to market conditions, the tooth model with the most ideal wear life among the two most commonly used types of tooth models is the Y-model teeth.

The discrete element method provides a significant advantage in determining wear data, thus providing insights into the ideal geometric structure and material for teeth used in backhoe loaders. This method will serve as a guide for future studies.

Acknowledgement

We owe a debt of gratitude to the Metalon Steel company for the information about the mechanical and chemical properties of teeth and the valuable information they provided about the bucket teeth of construction machinery.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): .15%

References

- [1] S.K. Gencer, Investigation of the effect of hardening heat treatment methods on the mechanical and wear properties of aisi 4140 quality steel. Master 's Thesis, Gebze Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Turkey, 2020.
- [2] J.M. Boac, R.P.K. Ambrose, M. E. Casada, R.G. Maghirang, D.E. Maier, Applications of discrete element method in modeling of grain postharvest operations. Food Engineering Reviews, 6(4), 128–149. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9090-y> 2014
- [3] F. Yılmaz, Analysis of wear effect, fatigue, and working life of backhoe loader bucket teeth with 1 m3 capacity under dynamic loads. Master 's Thesis, Niğde

- Omer Halisdemir University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Turkey, 2023
- [4] P. Wang, D. Si, S. Wang and Q. Yi, Study on gage widening methods for small-radius curves. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China, Applied Sciences. 2021.
- [5] M. Bahadır, M.A. Tekeli, New backhoe loader tooth model design, analysis and manufacturing. International Congress of Climate Change: Sustainability on Health, Agriculture, Food and Livestock Policies ICSAFL 2018 Amsterdam, Holland.
- [6] S. Oz, Dynamic analysis of backhoe loader bucket teeth. Master 's Thesis, Niğde Omer Halisdemir University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Turkey, 2022.
- [7] M. Ozdoğan, Bucket penetration mechanism and bucket penetration force of dragline excavators. 42, (1), 17-26. 2003
- [8] S. Kalpak, R. Dagwar, G. Telrandhe, Excavator bucket tooth failure analysis. International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology, 5 (2) issn: 2249-5762 (online) 2015.
- [9] S. Khan, M. Sheikh, Comparative analysis of wear for excavator bucket tooth using different materials. International Journal of Science and Research (IJSR), 5(5), 2016.
- [10] S.H. Suryo, W.M. Fawwaz, Y.A. Wijaya, E.W. Saputro, H. Harto, Analysis and topology optimization structural design excavator bucket tooth using finite element method. The 5th International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, And Chemical Engineering (ICIMECE 2019), 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0000531> 2020.
- [11] V.A. Polovinko, A.I. Fedulov, Abrasive wear of excavator teeth. Journal of Mining Science, 29, 48–51. 1993. <https://doi.org/10.1007/BF00734332>.
- [12] V. Moni, P. Klouda, T. Miletič, F. Helebrant, L. Donát, J. Blata, M. Řehoř, Evaluation of tooth no. 2674 and esco tooth 3d models. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering – MAPE, 2 (1) 2019.
- [13] Z. Virag & S. Sandor, Examination of an optimized replaceable cutting tooth of excavator. Geosciences and Engineering, 1 (2), 337–342 .2012.
- [14] M. Popović, I. Milićević, G. Marković, M. Marjanović, V. Vujičić, Load analysis for the design of cutting teeth for bucket chain excavators. 8th International Scientific Conference Technics and Informatics in Education Faculty of Technical Sciences, Čačak, Serbia, 18 - 20th September. 2020
- [15] Z. Ren, H. Sun, Y. Liang, Y. He, M. Feng, Strength analysis of excavator bucket based on normal digging trajectory and limiting digging force. Journal of Vibroengineering, 23(1), 2021
- [16] Í. Ovali, C. Esen, ANSYS Workbench.3 rd edition. 2018
- [17] Q. Bader, E. Kadum, Mean stress correction effects on the fatigue life behavior of steel alloys by using stress life approach theories. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, 14 (4), 50-58. <https://doi.org/10.12691/ajme-4-7-15> 2014.





MOORA yöntemleri ve TOPSIS arasındaki ilişkinin bir yatırım önceliği belirleme probleminde incelenmesi

Examination of the correlation between MOORA methods and TOPSIS in an investment priority problem

Sena Orhan¹ , Selen Avcı Azkeskin^{2,*} , Zerrin Aladağ³ 

^{1,2,3} Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, Türkiye

Öz

Yatırım, bir işletmenin gelişim yolunda kullandığı araçların başında gelmektedir. Özellikle maddi kaynak gerektiren yatırımların doğru planlanması, işletmenin geleceği açısından kritik olmaktadır. Bu çalışmada, üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin beş farklı üretim tesisi arasında yatırım planlaması yapılırken öncelik verilecek tesisin seçilmesi için çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan MOORA yöntemlerinden faydalanılmıştır. MOORA önem katsayısı ve TOPSIS yöntemlerinde kullanılmak üzere SWARA yöntemi ile kriter ağırlıkları elde edilmiştir. MOORA yöntemlerinin sonuçları, sıralama problemlerinde sıklıkla kullanılan TOPSIS yöntemiyle elde edilen sonuç ile karşılaştırılarak hangi MOORA yöntemlerinin daha güvenilir sonuçlar verdiği tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: MOORA, TOPSIS, SWARA, Çok kriterli karar verme (ÇKKV).

1 Giriş

Yatırımlar, geçmişten günümüze işletmelerin faaliyetlerini geliştirmek ve hacimlerini büyütmek için kullandığı en kritik araçlardan biri olmuştur. İşletmeler, doğru bir yatırım planı ile yatırımlarının karşılığını fazlasıyla alabilmektedir. Ancak mevcut kaynaklar her zaman en iyi yatırım senaryosunun uygulanmasını mümkün kılmaz. Bu noktada işletmelerin, yapılacak yatırımlara dair beklentileri net olarak tanımlaması, gerekli maliyet, zaman, insan gücü gibi kaynakların nasıl kullanılacağını belirlemesi, kısa, orta ve uzun vade planlarına dair verileri iyi bir şekilde tahminlemesi gerekmektedir.

İşletmeler, yatırım planı yaparken irili ufaklı pek çok yatırım projesini değerlendirebilmektedir. İşletme tarafından kaynak analizi yapılmış projeler arasından bir önceliklendirme yapılarak zaman planı çıkarılması ve genel bir yatırım planı oluşturulması gerekmektedir. Doğru bir önceliklendirme, seçilen projenin yanı sıra gelecekteki yatırım projelerinin bütçelerini de garanti altında tutabilmek açısından önem arz etmektedir. Bu noktada, işletmelerin yatırım projelerini sezgisel olarak önceliklendirmesi veya sadece yüksek kazanç amacına odaklanması durumu söz konusu olabilmektedir. Yatırımları etkileyen birden fazla kriter olması durumunda, sezgisel kararlar ya da tek bir

Abstract

Investment is a primary tool utilized in the course of a business's development. Particularly, the accurate planning of investments that require financial resources is crucial for the future of the business. In this study, MOORA, one of the multi-criteria decision-making (MCDM) methods, was employed to select the priority facility among five different production facilities of a business operating in the manufacturing sector while planning investments. The weights of criteria were obtained using the SWARA method to be used in MOORA importance coefficient and TOPSIS methods. The results of MOORA methods were compared with the results obtained by TOPSIS, which is frequently used in ranking problems, and it was discussed which MOORA methods provide more reliable results.

Keywords: MOORA, TOPSIS, SWARA, Multi-criteria decision making (MCDM).

kriterin dikkate alınması doğru karar için yeterli olmayabilir. Yatırım projeleri, gerekli verilerin toplanması, işletmeye özgü tüm kriterlerin dikkatle belirlenmesi ve kriterlerin önceliklendirilmesi ile birçok kriterli karar verme (ÇKKV) problemine dönüştürülebilir. ÇKKV yöntemleri ile birden fazla kriter göz önünde bulundurulurken alternatifler arasında en iyi çözüm karar vericiye sunulabilir ve doğru bir yatırım planı elde edilebilir.

ÇKKV, literatürde pek çok yöntem ile karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemler, genellikle birbiri ile çelişkili kriterler altında en iyi alternatif sunmak üzere formülize edilen bir dizi matematiksel işlemden oluşmaktadır. Karar probleminin verilerine, yapısına ve sonuçlardan beklentilere göre en uygun ÇKKV yöntemi seçilerek problemlere çözüm aranmaktadır.

Bu çalışmada, üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin beş farklı üretim tesisinde yatırım planlaması ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. İşletme, beş tesisi sağladıkları faydayı göz önünde bulundurarak önceliklendirmek istemektedir. İşletme bu önceliklendirmede; minimum çalışan kişi sayısı, minimum saatlik işçilik ücreti, maksimum vardiya çalışma süresi, maksimum yıllık üretim adedi, maksimum ortalama ürün karı amaçlarını gütmektedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: selenavciem@gmail.com (S. Avcı Azkeskin)

Geliş / Received: 14.07.2023 Kabul / Accepted: 29.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1326150

Çalışmada, işletme kriterlerinin kantitatif olduğu, farklı birim değerli veriler ve çelişkili kriterler içerdiği (maksimizasyon ve minimizasyon) gözlemlenmiştir. Yatırım kararı için hızlı bir karar mekanizmasına ve tutarlı sonuçlara ihtiyaç duyan işletmenin taleplerine karşılık ÇKKV yöntemlerinden biri olan MOORA (The Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis Method-Oran Analizi Temeline Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemi) yöntemleri probleme uygulanmıştır. MOORA'nın matematiksel kolaylığı hızlı bir karar mekanizması sağlamaktadır. Aynı zamanda tutarlı sonuçlar üretmesi açısından da avantajlı görülmektedir [1, 2, 3].

MOORA yöntemi, Brauers ve Zavadskas [2] tarafından literatüre kazandırılmıştır. MOORA, seçim kriterleri ve amaçlar arasındaki etkileşimleri bütünsel olarak ele alma ihtiyacından doğan, oran analizine dayalı olarak geliştirilmiş matematik tabanlı bir yöntemdir [2].

Literatürde çeşitli MOORA metodları bulunmaktadır. Oran Metodunda, eşit önemli olduğu varsayılan ölçütler bazında işlemler yapılmaktadır. Referans noktası metodu, oran metodundan elde edilen değerlerin maksimum referans noktaları belirlenerek amacın en küçük değer ya da en büyük değer amaçlı olmasına göre ayrı yönlendirmeler ile gerçekleştirilmektedir. Önem Katsayısı yönteminde belirlenen ağırlık katsayıları ile alternatiflerin performans skorları çarpılarak hesap yapılmaktadır. Bu yöntemde her bir alternatifin en büyük değere sahip olması gereken kriterlerinin değerleri toplanmakta, en küçük değere sahip olması gereken kriterlerinin değerleri çıkartılmaktadır [4]. Brauers ve Zavadskas [5] MOORA yönteminin bir diğer alt yöntemi olan tam çarpım formu yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda, her bir alternatifin en büyük ve en küçük değer amaçlı verileri ayrı ayrı çarpılarak çarpım sonuçları bölünmektedir. MULTI-MOORA ise MOORA ve tam

çarpım formunun birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. İki yöntem ile yapılan sıralamalar, baskınlıklarına göre değerlendirilerek son bir değerlendirme yapılması sağlanmaktadır. Bu özelliğiyle yöntem mevcut ÇKKV yöntemleri içinde duyarlılığı en iyi olanlardan biridir [6]. Tablo 1'de görüldüğü üzere MOORA yöntemi literatürde pek çok yöntemle birlikte kullanılmıştır. Ayrıca MOORA literatürde yatırım problemlerinde de sıklıkla kullanılmıştır. Bir sonraki paragrafta bu çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

Nguyen vd. [33] Vietnam Menkul Kıymetler Borsası Piyasasında endekslenen tarım şirketlerinin hisse senetlerini sıralamışlardır. Yatırım yapmak üzere en doğru hisseyi belirlemek üzere gri ilişkisel analiz, MOORA, AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmıştır. Yüksel vd. [34] G7 ülkelerinin enerji merkezi yatırımı seçimlerini MOORA yöntemi ile 7 faktör altında incelemişlerdir. Petrov [35] yenilenebilir enerji yatırım projelerinin seçimi için MOORA yöntemi ile birlikte objektif Shannon Entropy ve AHP yöntemlerinin bir entegrasyonunu kullanmıştır. Karande ve Chakraborty [36] MOORA yöntemine dayalı bulanık çok amaçlı optimizasyon çözümü ile iki ERP sistemden hangisine yatırım yapılması gerektiğine karar vermiş ve SAP'nin en iyi çözüm olduğunu tespit etmiştir. Mohagheghi ve Mousavi [37] yüksek teknoloji proje portföyüne yatırım seçimi için Pisagor bulanık WASPAS, MOORA ve matematiksel modelleme yöntemlerini kullanmıştır. Mandal ve Sarkar [38] akıllı üretim sistemi yatırımı yapmak için sahip oldukları seçenekleri bulanık MOORA yönteminden faydalanarak sıralamışlardır. Hamurcu ve Eren [39] kentsel hava kalitesinin iyileştirilerek bölge sakinlerinin yaşam kalitesinde artış sağlanması amacıyla en uygun elektrikli otobüse yatırım yapmak üzere MOORA ve TOPSIS yöntemlerinden faydalanmışlardır.

Tablo 1. MOORA yöntemi ile birlikte kullanılan diğer ÇKKV yöntemleri

Yazar	Yılı	Kullanılan Yöntem
Farida vd. [7]	2022	SMARTER, MOORA
Gümrah [8]	2022	VERİ ZARFLAMA ANALİZİ, MOORA
Baydaş [9]	2022	MOORA, MABAC, FUCA
Toslak vd. [10]	2022	MEREC, WEDBA, MOORA, WASPAS ve ROV
Savaş ve Yacan [11]	2022	BULANIK SWARA VE BULANIK MOORA
Coşkun ve Çetiner [12]	2022	ENTROPİ VE MOORA-ORAN
İnönü [13]	2022	ENTROPİ TABANLI ARAS VE MOORA
Yarlıkaş ve Öztürk [14]	2021	CRITIC, MOORA
Hatipoğlu ve Altan [15]	2021	MOORA
Aktürk [16]	2020	DOĞRUSAL FONKSİYON, MOORA
Deniz Başar ve Güneren Genç [17]	2020	LOJİSTİK REGRESYON, YAPAY SİNİR AĞLARI, MOORA
Özdemir [18]	2020	MOORA, MOOSRA
Topuk [19]	2020	EDAS VE MOORA
Yakut [20]	2020	MOORA, WASPAS, COPELAND
Selçuk vd. [21]	2020	SWARA-MOORA
Sarıoğlu ve Arslan [3]	2020	MOORA
Çanakçıoğlu [22]	2019	DEMATEL VE MOORA
Genç vd. [23]	2017	TOPSIS, ARAS ve MOORA
Orakçı ve Özdemir [24]	2017	GİA, MOORA
Durmaz vd. [25]	2017	HEDEF PROGRAMLAMA, MOORA
Metin vd. [26]	2017	TOPSIS, MOORA
Ömürbek ve Özcan [27]	2016	MULTIMOORA
Ömürbek ve Eren [28]	2016	PROMETHEE, MOORA ve COPRAS
Uygurtürk [29]	2015	BULANIK MOORA
Aktepe ve Ersöz [30]	2014	AHP-VIKOR ve MOORA
Özdağoğlu [31]	2014	MOORA
Karaca [32]	2011	AHP, PROMETHEE ve MOORA

Fettahoğlu vd. [40] bir ülkede yatırım kararı verilirken gayri safi milli hasıla (GSMH), ticari ortam ve ülke hakkındaki yatırım serbestisi faktörlerinin en etkili faktörler olduğunu; coğrafi uzaklık ve bilgi maliyeti faktörlerinin ise en az etkili faktörler olduğunu MOORA ve AHP yöntemleri ile belirlemişlerdir. D. Pamučar ve G. Čirović [41] lojistik merkezlerde manipülatif taşımacılığın (forklift) satın alınmasına ilişkin yatırım kararları sürecinde yeni DEMATEL-MABAC modelini uygulamışlardır. SAW, COPRAS, TOPSIS, MOORA ve VIKOR yöntemleri ile de sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dong vd. [42] rüzgâr enerjisi yatırımı seçiminde dikkate alınması gereken faktörlerin belirlenmesi için MOORA ve TOPSIS yöntemlerinden faydalanmışlardır. Teknik gelişme, finansal performans ve organizasyonel etkinlik en önemli kriterler olarak belirlenmiştir. Kocaman [43] portföy yatırım kararının verilmesinde yatırım yapılacak ülkenin belirlenmesi için MOORA ve AHP yöntemlerini kullanmıştır. Bircan vd. [44] Yozgat ilinde kompost tesis kümelerini ve yerlerini belirlerken yatırıma uygunluk kriterini MOORA ile incelemiş ve en iyi yatırım kararı için iki kümenin Yozgat'ın Sorgun ve Şefaati köylerinde konumlandırılması gerektiğini belirtmiştir. Kıyıcı vd. [45] bireysel emekliliğe yatırım yapacak bireyler için emeklilik yatırım fonlarını TOPSIS, VIKOR ve MOORA yöntemleri ile sıralamıştır. Vatansaver ve Uluköy [46] üretim sektöründe faaliyet gösteren bir firmada en uygun kurumsal kaynak planlama yazılımına yatırım yapılabilmesi için kriterleri bulanık AHP ile ağırlıklandırmış ve alternatifleri bulanık MOORA yöntemleri ile sıralamıştır. Keleş [47] yatırım yapılacak bir makine seçimi probleminde alternatif makineleri ENTROPİ ve MOORA yöntemlerini uygulayarak sıralamıştır. Uzun ve Yıldırım [48] bir gemi projesinde kullanılmak üzere yatırım yapılacak ekipmanların seçiminde TOPSIS, MOORA ve VIKOR yöntemlerini kullanmıştır. Bulut [49] yatırımcılar için en uygun organize sanayi bölgesinin seçiminde önemli olan kriterlerin ve bu kriterlerin önem düzeyinin belirlenmesi için MULTIMOORA yöntemini kullanmıştır. Khorshidi vd. [50] güneş enerjisi santrali yatırımı yapılacak en uygun lokasyonun seçimi için bulanık DEMATEL ve bulanık MOORA yöntemlerinden faydalanmış ve bulanık AHP ile duyarlılık analizi gerçekleştirmiştir. Sarkar vd. [51] MOORA ve MOOSRA yöntemleri ile yatırım yapılacak makinelerin seçiminde geleneksel olmayan makine seçim özelliklerini sıralandırmıştır. Brauers ve Ginevičius [52] Belçika hisselerine yatırım yapılması konusunda yönlendirici olması için MOORA ve MULTIMOORA yöntemlerini hisse seçim probleminde uygulamışlardır.

2 Materyal ve metot

Çalışmada MOORA yöntemleri, yatırım önceliklendirilmesi problemi çözümünde kullanılmıştır. Ayrıca, bir başka ÇKKV yöntemi olan ve literatürde sıralama problemlerinde sıklıkla kullanılan TOPSIS yöntemi, MOORA ile elde edilen sonuçları karşılaştırılmak üzere ikinci bir yöntem olarak seçilmiştir. Bu karşılaştırma ile sonraki yatırım kararlarında daha hızlı ve doğru karar verilebilmesi için hangi MOORA yönteminin daha etkin

olduğu ile ilgili bir değerlendirme yapılması hedeflenmiştir. MOORA yöntemlerinden biri olan Önem Katsayısı yöntemi ve TOPSIS yönteminin ihtiyaç duyduğu kriter ağırlıkları ise bir kriter ağırlıklandırma yöntemi olan SWARA yöntemi ile hesaplanmıştır.

2.1 MOORA yöntemi

Alternatiflerin kriterlere göre performans skorlarını gösteren Denklem (1)'deki X karar matrisi, yöntemin ilk adımı olarak oluşturulur [53].

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{1i} & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j1} & x_{ji} & x_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{mi} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Toplam alternatif sayısı " m " ile ifade edilirken " n " toplam nitelik/ölçüt/kriter sayısını ifade etmektedir. x_{ij} i . alternatifin j . amacına göre dengi iken $i=1,2,\dots,n$ kriterleri, $j=1,2,\dots,m$ alternatifleri ifade eder. Karar matrisi değerleri, Denklem (2) ile normalize edilir [2].

$$X_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Sonuca ulaşmak için en büyüğü hedefleyen skorların toplanması en küçüğü hedefleyen skorların çıkarılması gerekmektedir, bunun için Denklem (3)'teki formül uygulanır. $i=1,2,\dots,g$ en büyüğü hedefleyen ve $i=g+1,g+2,\dots,n$ en küçüğü hedefleyen amaçlardır.

y_i , normalize edilmiş j . alternatifini tüm amaçlara göre ifade eden değerdir. y_i değerleri ile MOORA oran yöntemine göre sıralama işlemi gerçekleştirilir [2].

$$y_i = \sum_{i=1}^{i=g} x_{ij} - \sum_{i=g+1}^{i=n} x_{ij} \quad (3)$$

Referans noktası yaklaşımında Denklem (2)'de normalize edilmiş karar matrisi değerlerinden, amaç en küçük olduğunda en küçük nokta, amaç en büyük olduğunda en büyük nokta seçilerek referans nokta bulunur. Bu referans noktalarından her bir alternatifin karar matrisindeki değerinin farkı alınarak uzaklıklar bulunur ve alternatifler Denklem (4)'teki gibi sıralanır. $x_{ij} > r_i$ koşulunda mutlak değer devreye girmektedir [2].

$$\min_{(j)} \{ \max_{(i)} |r_i - x_{ij}| \} \quad (4)$$

Önem katsayısı yönteminde farklı yöntemler ya da uzman kararı ile belirlenen kriter ağırlıkları ile alternatiflerin karar matrisi değerleri çarpılır. Her bir alternatifin en büyüğü amaçlayan kriterleri toplanıp; en küçüğü amaçlayanlar çıkartılır. Denklem (5) ile j . alternatifini değerlendiren y_j değerleri elde edilir ve bulunan değerler sıralanır. $i=1,2,\dots,g$

en büyüğü hedefleyen amaçları ve $i=g+1, g+2, \dots, n$ en küçüğü hedefleyen amaçları ifade eder [54].

$$y_i = \sum_{i=1} S_i X_{ij} - \sum_{i=g+1} S_i X_{ij} \quad (5)$$

Tam çarpım formu yönteminde en büyüğü amaçlayan değerler, en küçüğü amaçlayan değerlere **Denklem (8)**'deki gibi bölünür ve karar matrisi değerlerinden elde edilen U_j değerleri ile sıralama yapılır. **Denklem (6)**'da A_j ile ifade edilen en büyüğü amaçlayan formülü; **Denklem (7)**'de B_j ile ifade edilen en küçüğü amaçlayan formülü göstermektedir [54].

$$A_j = \prod_{g=1}^i x_{gi} \quad (6)$$

$$B_j = \prod_{k=i+1}^n x_{kj} \quad (7)$$

$$U_j = \frac{A_j}{B_j} \quad (8)$$

2.2 TOPSIS yöntemi

TOPSIS (Technique For Order Preference By Similarity To An Ideal Solution) yöntemi, pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak alternatifin seçilmesi üzerine altı aşamada formülize edilmiştir [23].

TOPSIS yönteminin de MOORA gibi 1. adımı **Denklem (1)**'deki X karar matrisi ile başlamaktadır. 2. adımda X matrisindeki x_{ij} değerleri kullanılarak, elemanları r_{ij} ile gösterilen ve **Denklem (9)**'daki formülle hesaplanan normalize karar matrisi elde edilir [23].

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (9)$$

3. adımda, önceden belirlenen ve **Denklem (10)**'a göre toplamları 1 olan kriter ağırlıkları, normalize karar matrisindeki değerler ile **Denklem (11)**'deki formüle göre çarpılır [23].

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (10)$$

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (11)$$

4. adımda, **Denklem (12)**'ye göre negatif ideal, **Denklem (13)**'e göre pozitif ideal çözüm değerleri tanımlanır. J faydayı (maksimizasyon), J' maliyet oluşturacak (minimizasyon) kriteri temsil ederken X^- en az tercih edilen, negatif ideal çözümü ve X^+ en fazla tercih edilen pozitif ideal çözümü göstermektedir [23].

$$X^- = (\min_i v_{ij} | j \in J), (\max_i v_{ij} | j \in J'), \quad (12)$$

$$i=1,2,\dots,m \Rightarrow \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

$$X^+ = (\max_i v_{ij} | j \in J), (\min_i v_{ij} | j \in J'), \quad (13)$$

$$i=1,2,\dots,m \Rightarrow \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

5. adımda öklit uzaklık formülü yardımıyla pozitif ideal çözümden uzaklığı hesaplamak üzere **Denklem (14)**, negatif ideal çözümden uzaklığı hesaplamak üzere **Denklem (15)** kullanılmaktadır [23].

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2 \quad (14)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2 \quad (15)$$

6. ve son adımda ise her bir alternatifin ideal çözüme göreli yakınlığı, **Denklem (16)**'daki formül kullanılarak hesaplanır [23].

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (16)$$

Burada C_i^* 0 ile 1 aralığında değerler alır. X_i ile X^+ eşit ise C_i^* 1 değerini alır, bu durum alternatifin pozitif ideal çözüme mutlak yakınlığını ifade eder. X_i ile X^- nin eşit olması durumunda ise C_i^* 0 değerini alır ve bu ilgili alternatifin pozitif ideal çözüme mutlak yakınlığını ifade eder. Alternatifler, ideal çözüme yakınlıklarına göre en yüksek C_i^* değerinden başlanarak sıralanır [23].

2.3 SWARA yöntemi

SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemi, alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan kriterleri öncelik sırasına koyarak önemsiz kriterleri elemek üzere formülize edilmiştir. Kriterlere verilen sıra ile kriter ağırlıkları hesaplanmaktadır [11].

SWARA yönteminin 1. adımında kriterler karar vericilerin kişisel değerlendirmeleri ile önemliden önemsizce doğru sıralanır.

2. adımda karar vericiler ikinci önemli kriterden başlayarak, her bir kriter için görece önem düzeylerini belirler. Bunun için, “ j ” kriteri ile bir önceki kriter “ $j-1$ ” karşılaştırılır. Bu oran “ortalama değerin karşılaştırmalı önemi” olarak adlandırılmıştır ve s_j simgesi ile gösterilmektedir.

3. adımda tüm kriterler için katsayı değeri k_j **Denklem (17)**'den yararlanarak belirlenir. En büyük s_j değerine sahip kriterlere ait katsayı $k_j=1$ değerini almaktadır.

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ s_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (17)$$

4. adımda tüm kriterler için 3. adımdaki hesaplama sonucu yeni bir vektör elde edilir. **Denklem (18)** ile önem vektörü “ q_j ” hesaplanır. Vektör için birinci sıradaki kriterin düzeltilmiş ağırlığı “ $q_j=1$ ” dir.

$$q_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (18)$$

5. adımda tüm kriterler için göreceli ağırlık değeri w_j hesaplanmaktadır. **Denklem (19)**'daki w_j simgesi, j kriterinin göreceli ağırlığını göstermektedir.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad (19)$$

3 Uygulama

Üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin beş farklı üretim tesisi bulunmaktadır. İşletme, tesislerine yatırım yaparken sağladığı fayda yüksek olan tesise öncelik vermek istemektedir. İşletme bu önceliklendirmede; minimum çalışan kişi sayısı ve saatlik işçilik ücreti (maliyet kriterleri) ile maksimum vardiya çalışma süresi, yıllık üretim adedi ve ortalama ürün karı (fayda kriterleri) kriterlerini dikkate almaya karar vermiştir. 5 tesis arasında önceliklendirme yapmak için MOORA yöntemi kullanılmıştır ve MOORA yönteminin sonuçları TOPSIS yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Kriterler, ilgili tesiste çalışan uzmanların görüşleri doğrultusunda SWARA yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır.

Tablo 2'de X karar matrisinin 5 kriter ve 5 alternatifine dair işletme verileri yer almaktadır.

Tablo 2. X karar matrisine ait veriler

Tesis	Çalışan (kişi)	Saatlik işçilik ücreti (birim)	Çalışma süresi (saat)	Üretim (adet)	Ort. ürün karı (birim)
A	1185	5.75	7.2	910750	2.34
B	495	6.03	7.1	68700	24.74
C	560	5.85	7	925650	2.57
D	320	5.74	6.8	743900	2.47
E	490	6.17	6.9	839450	2.24

3.1 Multi oran yöntemi

Multi oran değerlerini elde etmek için karar matrisi **Denklem (2)** kullanılarak **Tablo 3**'teki gibi normalize edilmiştir.

Tablo 3. Normalize karar matrisi

Tesis	(min) Çalışan	(min) Saatlik işçilik ücreti	(maks) Çalışma süresi	(maks) Üretim	(maks) Ort. ürün karı
A	0.7805	0.4353	0.4589	0.5303	0.0930
B	0.3260	0.4562	0.4535	0.0400	0.9815
C	0.3688	0.4422	0.4461	0.5390	0.1020
D	0.2108	0.4343	0.4375	0.4332	0.0981
E	0.3227	0.4671	0.4397	0.4888	0.0889

Denklem (2) kullanılarak normalize edilmiş karar matrisinde her bir tesis için maliyet ve fayda kriterlerine göre **Denklem (3)** kullanılarak elde edilen Multi oran yönteminin sonuçları **Tablo 4**'teki gibidir.

Tablo 4. Multi oran yöntemi sonuçları

Tesis	A	B	C	D	E
Multi Oran Değerleri	-0.1336	0.6928	0.2761	0.3237	0.2276
Multi Oran Sıralama	5	1	3	2	4

3.2 Referans noktası yöntemi

Denklem (2)'ye göre normalize edilmiş karar matrisinde maliyet kriterleri için en küçük, fayda kriterleri için en büyük değerler **Tablo 5**'teki gibi hesaplanır.

Tablo 5. Referans noktası belirleme

Tesis	(min) Çalışan	(min) Saatlik işçilik ücreti	(max) Çalışma süresi	(max) Üretim	(max) Ort. ürün karı
A	0.7805	0.4353	0.4589	0.5303	0.0930
B	0.3260	0.4562	0.4535	0.0400	0.9815
C	0.3688	0.4422	0.4461	0.5390	0.1020
D	0.2108	0.4343	0.4375	0.4332	0.0981
E	0.3227	0.4671	0.4397	0.4888	0.0889
RN	0.2108	0.4343	0.4589	0.5390	0.9815

Her bir verinin referans noktasından farkı alınarak uzaklıklar **Tablo 6**'daki gibi hesaplanır.

Tablo 6. Referans noktasına uzaklıklar

Tesis	(min) Çalışan	(min) Saatlik işçilik ücreti	(max) Çalışma süresi	(max) Üretim	(max) Ort. ürün karı
A	-0.5697	-0.0010	0.0000	0.0087	0.8886
B	-0.1153	-0.0219	0.0053	0.4990	0.0000
C	-0.1581	-0.0079	0.0128	0.0000	0.8795
D	0.0000	0.0000	0.0213	0.1058	0.8835
E	-0.1120	-0.0328	0.0192	0.0502	0.8927

Denklem (4)'e göre alternatifte ait en büyük uzaklık multi referans değeridir. **Tablo 7**'deki gibi küçükten büyüğe sıralanır.

Tablo 7. Multi referans yöntemi sonuçları

Tesis	A	B	C	D	E
Referans noktası değerleri	0.8886	0.499	0.8795	0.8835	0.8927
Referans noktası sıralama	4	1	2	3	5

3.3 Önem katsayısı yöntemi

Önem katsayısı ve TOPSIS yöntemlerinde kullanılmak üzere SWARA yöntemi ile belirlenen kriterlerin ağırlıklarına göre önem katsayısı yönteminin değerleri **Tablo 8**'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 8. Önem katsayısı değerleri

Tesis	(min) Çalışan	(min) Saatlik işçilik ücreti	(maks) Çalışma süresi	(maks) Üretim	(maks) Ort. ürün karı
A	0.1497	0.0831	0.0718	0.1193	0.0216
B	0.0626	0.0871	0.0710	0.0090	0.2280
C	0.0708	0.0844	0.0698	0.1212	0.0237
D	0.0404	0.0829	0.0685	0.0974	0.0228
E	0.0619	0.0892	0.0688	0.1099	0.0206
Ağırlık	0.19	0.19	0.16	0.22	0.23

Denklem (5)'e göre maksimize edilecek amaçlar toplanırken minimize edilecekler çıkarılarak **Tablo 9**'daki sıralama elde edilir.

Tablo 9. Önem katsayısı yöntemi sonuçları

Tesis	A	B	C	D	E
Önem katsayısı değerleri	-0.0202	0.1583	0.0595	0.0653	0.0483
Önem katsayısı sıralama	5	1	3	2	4

3.4 Tam çarpım formu yöntemi

Denklem (6)'ya göre tam çarpım formu yönteminde ilk karar matrisindeki maksimize edilecek değerler çarpılır ve Denklem (7)'ye göre minimize edilecek değerlerin çarpımına Denklem (8)'deki gibi bölünür. Tam çarpım formu değerleri Tablo 10'daki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 10. Tam çarpım formu yöntemi sonuçları

Tesis	A	B	C	D	E
Tam çarpım değerleri	2243.58	4033.8	5067.95	6841.7	4268.6
Tam çarpım sıralama	5	4	2	1	3

3.5 Multi-MOORA yöntemi

Tüm MOORA yöntemlerinden hesaplanan sıralamalara göre seçimlerin baskınlığı Multi-MOORA yaklaşımı ile belirlenmiştir. Multi-MOORA sıralaması Tablo 11'deki gibidir.

Tablo 11. Multi-MOORA yöntemi sonuçları

Tesis	Multi Oran	Referans noktası	Önem katsayısı	Tam çarpım	Multi-MOORA
A	5	4	5	5	5
B	1	1	1	4	1
C	3	2	3	2	3
D	2	3	2	1	2
E	4	5	4	3	4

3.6 TOPSIS yöntemi

SWARA ile hesaplanan ağırlıklar TOPSIS karar matrisine eklenerek Tablo 12 elde edilmiştir.

Tablo 12. Ağırlıklar eklenmiş TOPSIS karar matrisi

Amaç	maliyet	maliyet	fayda	fayda	fayda
Ağırlık	0.19	0.19	0.16	0.22	0.23
Tesis	Çalışan (Kişi)	Saatlik işçilik ücreti	Vardiyalık çalışılan süre	Üretim	Ortalama ürün karı
A	1185	5.75	7.2	910750	2.34
B	495	6.03	7.1	68700	24.74
C	560	5.85	7	925650	2.57
D	320	5.74	6.8	743900	2.47
E	490	6.17	6.9	839450	2.24

Denklem (9)'a göre normalizase edilen karar matrisi Denklem (11)'e göre ağırlıklar ile çarpıldığında Tablo 13'teki ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi elde edilmiştir.

Tablo 13. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi

Tesis	Çalışan (Kişi)	Saatlik işçilik ücreti	Vardiyalık çalışılan süre	Üretim	Ortalama ürün karı
A	0.1497	0.0831	0.0719	0.1193	0.0216
B	0.0626	0.0871	0.0709	0.0090	0.2280
C	0.0708	0.0845	0.0700	0.1212	0.0237
D	0.0404	0.0829	0.0680	0.0974	0.0228
E	0.0619	0.0891	0.0690	0.1099	0.0206

Denklem (12) ile ideal ve Denklem (13) ile negatif ideal değerler Tablo 14'teki gibi hesaplanır.

Tablo 14. İdeal ve negatif ideal değerler

	Çalışan	Saatlik işçilik ücreti	Vardiyalık çalışılan süre	Üretim	Ortalama ürün karı
V ⁺	0.0404	0.0829	0.0719	0.1212	0.2280
V ⁻	0.1497	0.0891	0.0680	0.0090	0.0206

Denklem (14) ile ideal ve Denklem (15) ile negatif ideal değerlere göre uzaklıklar bulunur. Denklem (16)'ya göre ideal çözüme yakınlık değerleri Tablo 15'teki gibi hesaplanır ve büyükten küçüğe sıralanır.

Tablo 15. İdeal ve negatif ideal değerlere göreli yakınlık

Tesis	S _I ⁺	S _I ⁻	C _I ⁺	Sıralama
A	0.2336	0.1105	0.3211	5
B	0.1144	0.2250	0.6628	1
C	0.2066	0.1373	0.3993	3
D	0.2067	0.1407	0.4051	2
E	0.2089	0.1338	0.3904	4

4 Bulgular

MOORA Oran, MOORA önem katsayısı ve Multi-MOORA yöntemlerinin sonuçları ile TOPSIS yöntemi aynı sonucu vermiştir. Tablo 16'da da görülebileceği üzere referans noktası ve tam çarpım yöntemlerinde benzerlik oranı hem kendi aralarında hem diğer yöntemlere göre düşüktür.

Tablo 16. MOORA ve TOPSIS yöntemlerine ait sıralamalar

Tesis	Multi Oran	Referans noktası	Önem katsayısı	Tam çarpım	Multi-MOORA	TOPSIS
A	5	4	5	5	5	5
B	1	1	1	4	1	1
C	3	2	3	2	3	3
D	2	3	2	1	2	2
E	4	5	4	3	4	4

Yöntemlerden elde edilen sıralamalar Tablo 17'de Kendall's tau korelasyon katsayısı ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, Referans noktası yöntemi TOPSIS'e Tam çarpım yöntemine göre daha benzemektedir.

Tablo 17. Yöntemlerin benzerliklerinin incelenmesi

Yöntem	Multi Oran	Referans noktası	Önem katsayısı	Tam çarpım	Multi-MOORA	TOPSIS
Multi Oran	1.00	0.60	1.00	0.40	1.00	1.00
Referans noktası	0.60	1.00	0.60	0.00	0.60	0.60
Önem katsayısı	1.00	0.60	1.00	0.40	1.00	1.00
Tam çarpım	0.40	0.00	0.40	1.00	0.40	0.40
Multi-MOORA	1.00	0.60	1.00	0.40	1.00	1.00

5 Sonuçlar

Yatırım kararlarının sonuçları hayati olabileceğinden işletmeler yatırımlarını planlarken dikkatli olmalıdır. Çeşitli sıralama ve ağırlıklandırma yöntemleri ile alınan kararlar subjektif kararlardan çok daha güvenli olacaktır.

MOORA yöntemlerinden hepsinin aynı sonuçları vermediği göz önünde bulundurulduğunda Multi-MOORA yöntemi ile ortak sonuçtan bir sıralama elde etmek daha güvenilir olabilir. Çalışmada, MOORA oran ve önem

katsayısı yöntemlerinin TOPSIS ile aynı sonuçları vermiş olması hızlı bir çözüme ulaşmak için bu yöntemlerden biri ile ilerlenebileceğini göstermektedir. Karar vericilerin amaçlarına ve kriterlerinin yapısına göre bir MOORA yöntemi doğru bir karar verilmesinde etkili olacaktır.

Güvenilirliği artırma amacı güdülür ise incelenen yatırım problemi özelinde ağırlıklandırma sürecindeki karar verici sayısı artırılabilir. Genel kriterler daha özel kriterlere ayrılarak MOORA ve TOPSIS'ten elde edilen sonuçlar yeniden karşılaştırılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] M. S. Chakraborty, Applications of the MOORA method for decision making in manufacturing environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(9), 1155-1166, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2972-0>.
- [2] W. K. Brauers and E. K. Zavadskas, The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics*, 35(2), 445-469, 2006. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/228345226>.
- [3] M. Sarıoğlan ve K. Arslan, Yiyecek içecek işletmelerinde MOORA yöntemi ile tedarikçi seçiminin uygulanabilirliği. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(73), 254-270, 2020. <https://doi.org/10.17755/esosder.529386>
- [4] Konu 13: Çok ölçütlü karar verme yöntemleri – V <https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=83423>, Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2023.
- [5] W. K. Brauers and E. K. Zavadskas, Project management by MULTIMOORA as an instrument for transition economies, *Technological and Economic Development of Economy*, 16(1), 5-24, 2010. <https://doi.org/10.3846/tede.2010.01>.
- [6] A. Özbek, Akademik birim yöneticilerinin MOORA yöntemiyle seçilmesi: Kırıkkale üzerine bir uygulama. *Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1(38), 1-18, 2015. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erusosbilder/issue/23772/253408>.
- [7] I. N. Farida, U. Mahdiyah and A. F. H. Setiawan, Sensitivity analysis of the SMARTER and MOORA methods in decision making of achieving students. *Jurnal Infotel*, 14(3), 168-173, 2022. <https://doi.org/10.20895/infotel.v14i3.751>.
- [8] A. Gümrah, Lojistik maliyetler ve firma performansına etkisi: Borsa İstanbul gıda sektöründe bir uygulama. *İşletme Akademisi Dergisi*, 3(3), 351-362, 2022. <https://doi.org/10.26677/TR1010.2022.1100>.
- [9] M. Baydaş, The effect of pandemic conditions on financial success rankings of BIST SME industrial companies: a different evaluation with the help of comparison of special capabilities of MOORA, MABAC and FUCA methods. *Business & Management Studies: An International Journal*, 10(1), 245-260, 2022. <https://doi.org/10.15295/bmij.v10i1.1997>.
- [10] M. Toslak, B. Aktürk ve A. Ulutaş, MEREK ve WEDBA yöntemleri ile bir lojistik firmasının yıllara göre performansının değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 33, 363-372, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1041106>.
- [11] H. Savaş ve İ. Yacan, Dış kaynak kullanım stratejisi kapsamında alt yüklenicilerin bulanık SWARA ve bulanık MOORA yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 13(2), 504-522, 2022. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumus/issue/70421/1012877>.
- [12] A. Coşkun ve H. etiner, Piyasa çarpanlarıyla performans analizi: Borsa İstanbul'da işlem gören turizm şirketlerinin entropi ve MOORA-Oran yöntemleriyle incelenmesi. *Turizm Akademik Dergisi*, 9(1), 157-177, 2022. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/touraj/issue/70329/1105334>.
- [13] G. İnönü, ENTROPİ tabanlı ARAS ve MOORA yöntemleri ile Borsa İstanbul'da finansal performans analizi. *Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye*, 2022.
- [14] S. Yarlıkaş ve C. Öztürk, Bankacılık sektöründe kurumsal sürdürülebilirlik performansının Critic-Moora önem katsayısı yaklaşımı ile değerlendirilmesi. *Journal of Social and Humanities Sciences Research*, 8(77), 3124-3136, 2021. <http://dx.doi.org/10.26450/jshsr.2863>.
- [15] C. Hatipoğlu ve İ. M. Altan, Türkiye'de e-Ticaret hizmetlerinin MOORA yönetimi ile incelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 68, 372-383, 2021. <https://doi.org/10.51290/dpusbe.875064>.
- [16] C. Aktürk, Pazarlama 4.0 için genetik algoritma tabanlı bir karar destek modeli önerisi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 346-356, 2020. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.554916>.
- [17] Ö. Deniz Başar ve E. Güneren Genç, Ülkelerin güvenli olmalarının tahmininde lojistik regresyon, yapay sinir ağları ve MOORA yöntemlerinin karşılaştırılması. *Journal of Life Economics*, 7(2) , 123-134, 2020. <https://doi.org/10.15637/jlecon.7.008>.
- [18] M. H. Özdemir, MOORA ve MOOSRA yöntemleriyle akıllı telefon seçimi. *Istanbul Management Journal*, 89, 157-170, 2020. <https://doi.org/10.26650/imj.2020.89.007>.
- [19] N. Topuk, Türkiyede kargo şirketi olarak faaliyet gösteren firmaların EDAS ve MOORA yöntemleri ile değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye*, 2020.
- [20] E. Yakut, OECD ülkelerinin bilgi ve iletişim teknolojileri gelişmişliklerinin MOORA ve WASPAS yöntemiyle değerlendirilerek kullanılan yöntemlerin

- Copeland yöntemiyle karşılaştırılması. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 24(3), 1275-1294, 2020. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/ataunisobil/issue/57299/770658>.
- [21] O. Selçuk, H. Karakaş ve E. İpekçi Çetin, Antalya ilinde turizme açık doğal alanların tehlike düzeylerinin bütünlük SWARA-MOORA yöntemi ile belirlenmesi. Coğrafya Dergisi, 41, 77-91, 2020. <https://doi.org/10.26650/jgeog2020-0059>.
- [22] M. Çanakçıoğlu, Dematel ve MOORA Bütünlük yaklaşımı ile BİST metal eşya, makine endeksindeki işletmelerin finansal performanslarının değerlendirilmesi. İşletme Araştırmaları Dergisi, 11(4), 2425-2441, 2019. Retrieved from <https://isarder.org/index.php/isarder/article/view/914>.
- [23] A. Genç, T. Avcı ve H. Sevgin, Karadeniz ekonomik işbirliği üye ülkelerine ilişkin etkinlik analizi: TOPSIS, ARAS ve MOORA yöntemleriyle bir uygulama. Pamukkale Journal of Eurasian Socioeconomic Studies, 4(2), 15-40, 2017. <https://doi.org/10.5505/pjess.2017.07269>.
- [24] E. Orakçı ve A. Özdemir, Telafi edici çok kriterli karar verme yöntemleri ile Türkiye ve AB ülkelerinin insani gelişmişlik düzeylerinin belirlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 19(1), 61-74, 2017. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akuiibfd/issue/29881/321945>.
- [25] E. D. Durmaz, E. Akgündüz ve R. Şahin, Tedarikçi seçim probleminde hedef programlama ve MOORA yöntemi: uygulama çalışması. Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 19(3), 1021-1044, 2017. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/gaziuiibfd/issue/36599/416585>.
- [26] S. Metin, S. Yaman ve T. Korkmaz, Finansal performansın TOPSIS ve MOORA yöntemleri ile belirlenmesi: BİST enerji firmaları üzerine karşılaştırmalı bir uygulama. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 14(2), 371-394, 2017. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/ksusbd/issue/31599/319321>.
- [27] N. Ömürbek ve A. Özcan, BİST’de işlem gören sigorta şirketlerinin MULTIMOORA yöntemiyle performans ölçümü. Uluslararası İşletme, Ekonomi ve Yönetim Perspektifleri Dergisi, 1(2), 64-75, 2016. <https://doi.org/10.20989/ijbemp.9>.
- [28] N. Ömürbek ve H. Eren, PROMETHEE, MOORA ve COPRAS yöntemleri ile oran analizi sonuçlarının değerlendirilmesi: bir uygulama. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 8(16), 174-187, 2016. <https://doi.org/10.20875/sb.69615>.
- [29] H. Uygurtürk, Bankaların internet şubelerinin bulanık MOORA yöntemi ile değerlendirilmesi. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, 11(25), 115-128, 2015. <https://doi.org/10.17130/ijmeh.2015.11.25.791>.
- [30] A. Aktepe ve S. Ersöz, AHP-VIKOR ve MOORA yöntemlerinin depo yeri seçim probleminde uygulanması. Endüstri Mühendisliği, 25(1), 2-15, 2014. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/industri/issue/46770/586313>.
- [31] A. Özdağoğlu, Normalizasyon yöntemlerinin çok ölçütlü karar verme sürecine etkisi-MOORA yöntemi incelemesi. Ege Academic Review, 14(2), 2014. <https://doi.org/10.21121/eab.2014218058>.
- [32] T. Karaca, Proje yönetiminde çok kriterli karar verme tekniklerini kullanarak kritik yolun belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [33] P. Nguyen, Tsai H., Kumar J. F. and Y. C. Hu, Stock investment of agriculture companies in the Vietnam stock exchange market: An AHP integrated with GRA-TOPSIS-MOORA approaches. Journal of Asian Finance, Economics and Business, 7(7), 113-121, 2020. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO202020952022422.pdf>.
- [34] S. Yüksel, A. Mikhaylov and L. Khomyakova, Energy center selection in G7 industry with fuzzy MOORA. In Handbook of research on strategic management for current energy investments. In: S. Yüksel, H Dincer (eds.), Handbook of Research on Strategic Management for Current Energy Investments, pp. 87-106, 2021. Retrieved from <https://www.igi-global.com/chapter/energy-center-selection-in-g7-industry-with-fuzzy-moora/281189>
- [35] I. Petrov, Renewable energies projects selection: block criteria systematization with AHP and Entropy-MOORA methods in MCDM. 26th Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines (PEPM’2021), pp. 1-8, E3S Web of Conference, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132702004>.
- [36] P. Karande and S. Chakraborty, A Fuzzy-MOORA approach for ERP system selection. Decision Science Letters, 1(1), 11-21, 2012. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2012.07.001>.
- [37] V. Mohagheghi and S. M. Mousavi, A new framework for high-technology project evaluation and project portfolio selection based on Pythagorean fuzzy WASPAS, MOORA and mathematical modeling. Iranian Journal of Fuzzy Systems, 16(6), 89-106, 2019. [10.22111/IJFS.2019.5022](https://doi.org/10.22111/IJFS.2019.5022).
- [38] U. K. Mandal and B. Sarkar, Selection of best intelligent manufacturing system (ims) under fuzzy moora conflicting mcdm environment. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2(9), 301-310, 2012. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=0e979c3f2efcb6046ca5676a2406a639c01c5457>.
- [39] M. Hamurcu and T. Eren, Applications of the MOORA and TOPSIS methods for decision of electric vehicles in public transportation technology. Transport, 37(4), 251-263, 2022. <https://doi.org/10.3846/transport.2022.17783>.
- [40] S. Fettahoğlu, B. Özcan and H. Kocaman, An application of the portfolio investment choices with

- multi-purpose decision making methods in emerging countries. Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 22(1), 145-162, 2020. <https://doi.org/10.32709/akusosbil.462235>.
- [41] D. Pamučar and G. Čirović, The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC). Expert Systems With Applications, 42(6), 3016-3028, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057>.
- [42] W. Dong, G. Zhao, S. Yüksel, H. Dinçer and G. G. Ubay, A novel hybrid decision making approach for the strategic selection of wind energy projects. Renewable Energy, 185, 321-337, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.077>.
- [43] H. Kocaman, Gelişmekte olan ülkelerde çok amaçlı karar verme yöntemiyle portföy yatırım kararı üzerine bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [44] H. Bircan, H. Eleroğlu ve R. Arslan, Yozgat ilinde kurulabilecek kompost tesislerinin MOORA yöntemiyle optimallik sıralaması. Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 5(12), 83-90, 2018. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/asead/issue/41905/505235>.
- [45] U. Kıyıcı, T. Korkmaz ve H. Uygurtürk, Türkiye'deki bireysel emeklilik yatırım fonlarının TOPSIS, VIKOR ve MOORA yöntemleri ile karşılaştırmalı performans değerlendirmesi. Sosyal Bilimler Metinleri, 2, 1-16, 2016. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/773959#page=9>.
- [46] K. Vatansever ve M. Uluköy, Kurumsal kaynak planlaması sistemlerinin bulanık AHP ve bulanık MOORA yöntemleriyle seçimi: Üretim sektöründe bir uygulama. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 11(2), 274-293, 2013. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/cbayarsos/issue/4064/53561>.
- [47] R. Keleş, Üretim işletmelerinde ENTROPİ tabanlı MOORA yöntemi ile makine seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2023.
- [48] S. Uzun and B. F. Yıldırım, Equipment selection in ship building process: TOPSIS, MOORA, VIKOR application. Eurasian Academy of Sciences Eurasian Business & Economics Journal, 2, 113-124, 2016. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.17740/eas.econ.2016-MSEMP-57>.
- [49] T. Bulut, MULTIMOORA yöntemi ile farklı illerdeki organize sanayi bölgelerinin yabancı yatırımcılar açısından optimal yer seçimi olarak değerlendirilmesi. Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar, 624, 41-52, 2017. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/fpeyd/issue/48021/607315>.
- [50] M Khorshidi, B. Erkayman, Ö. Albayrak, R. Kılıç and H. İ. Demir, Solar power plant location selection using integrated fuzzy DEMATEL and fuzzy MOORA method. International Journal of Ambient Energy, 43(1), 7400-7409, 2022. <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2068067>.
- [51] A. Sarkar, S. C. Panja, D. Das and B. Sarkar, Developing an efficient decision support system for non-traditional machine selection: an application of MOORA and MOOSRA. Production & Manufacturing Research, 3(1), 324-342, 2015. <https://doi.org/10.1080/21693277.2014.895688>.
- [52] W. K. Brauers and R. Ginevičius, How to invest in Belgian shares by MULTIMOORA optimization. Journal of Business Economics and management, 14(5), 940-956, 2013. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/16111699.2013.837244>.
- [53] W. K. M. Brauers, E. K. Zavadskas, F. Peldschus and Z. Turskis, Multi objective decision making for road design. Transport. 23(3). 183-193, 2008. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/26541974>.
- [54] W. K. M. Brauers, R. Ginevičius and V. Podvezko, Regional development in Lithuania considering multiple objectives by the MOORA Method. Technological and Economic Development of Economy, 16(4), 613-640, 2010. <https://doi.org/10.3846/tede.2010.38>.





M91/IM10 tek yönlü prepreg plakanın yüksek burkulma mukavemetine sahip olacak şekilde genetik algoritma yöntemi ile açı dizilimi optimizasyonu

Stacking sequence optimization of M91/IM10 unidirectional prepreg plate with high buckling strength by genetic algorithm method

İzzet Kaya^{1,*} , Serhat Yılmaz² 

^{1,2} Milli Savunma Üniversitesi, Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Havacılık ve Uzay Ana Bilim Dalı, 34344, İstanbul Türkiye

Öz

Bu makalede, havacılık alanında kullanılan malzemeler ile karşılaştırıldığı zaman dayanımı oldukça yüksek olan M91/IM10 tek yönlü prepreg malzemesinden üretilmiş bir plakanın burkulma yük faktörünün maksimum olduğu optimum katman dizilimi genetik algoritma yöntemi ile elde edilmiştir. Söz konusu kompozit plaka 4 tarafından basit destekli ve çift eksenli düzlem içi basınç yüklerine maruz kalan bir plakadır. Genetik algoritma yöntemi kullanılarak geliştirilen bilgisayar kodu ile çeşitli yük durumu ve çeşitli plaka en boy oranı kombinasyonları için belirli fiber açısı aralıklarında ve belirli katman sayısında maksimum burkulma dayanımını sağlayan katman dizilimleri elde edilir. Laminatın simetrik ve dengeli olduğu kabul edilir. Bulunan sonuçlar literatürde çalışmaları bulunan grafit/epoksi kompozit malzemesinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda M91/IM10 prepreg malzemesinden imal edilmiş bir plakanın aynı burkulma performansını grafit epoksi'den daha hafif yapılarla sağlayabildiğini ortaya çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler: Burkulma, Genetik algoritma, Katman dizilimi, Kompozit

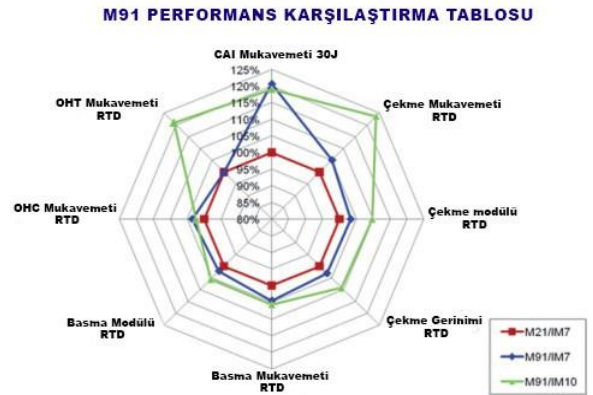
1 Giriş

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, mühendislik için uygun özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve denizcilik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiber takviyeli lamine kompozitler, kalınlık yönünde laminasyon düzleminden daha zayıf oldukları için düzlem dışı yüklemeye karşı hassastır. Bu nedenle, ara katman ve elyaf/matris arayüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, düzlem dışı yük taşıma performansını dolaylı olarak etkiler [1]. Kullanımı giderek yaygınlaşan kompozit malzemeler genellikle sertlik-ağırlık veya mukavemet-ağırlık oranlarının önemli olduğu durumlarda tercih edilirler. Diğer kompozit malzemelerde karşılaştırıldığı zaman havacılık alanında oldukça öne çıkan M91 yeni nesil prepreg malzemesi gövde ana yapıları ve motorlar için performans sınırlarını genişleterek, havacılık ve uzay ekipman üreticilerinin daha hafif, daha hızlı ve daha verimli uçaklar üretmeye yönelik artan ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

Abstract

In this article, the optimum stacking sequence with maximum buckling load factor of a plate made of M91/IM10 unidirectional prepreg material, which has a very high strength compared to the materials used in the aerospace industry, is obtained by genetic algorithm method. The composite plate in question is simply supported at 4 edges and subjected to biaxial in-plane compressive loads. With the computer code developed using the genetic algorithm method, stacking sequences that provide maximum buckling strength at certain fiber angle ranges and certain number of layers for various load cases and various plate aspect ratio combinations are obtained. The laminate is assumed to be symmetrical and balanced. The results are compared with the results obtained from graphite/epoxy composite material, which has been studied in the literature. The comparison reveals that a plate made of M91/IM10 prepreg material can provide the same buckling performance with lighter structures than graphite epoxy.

Keywords: Buckling, Genetic algorithm, Stacking sequence, Composite



Şekil 1. M21/IM7, M91/IM7 ve M91/IM10 prepreg malzemelerin performans karşılaştırması [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: izzet9696@hotmail.com (İ. Kaya)

Geliş / Received: 13.07.2023 Kabul / Accepted: 21.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1327137

HexPly M91, darbe sonrası çok yüksek artık sıkıştırma mukavemeti (CAI) ile mükemmel tokluk özelliği ve Hexcel'in yeni HexTow IM10 fiberiyle birlikte geliştirilmiş çekme performansı sağlar. M21/IM7, M91/IM7 ve M91/IM10 prepreg malzemelerinin oda sıcaklığı/kuru (RTD) şartlarda open hole basma (OHC) mukavemeti, open hole çekme (OHT) mukavemeti, CAI mukavemeti ve basma/çekme mukavemeti/gerinimi/modülü **Şekil 1**'de gösterilmektedir.

120°C'ye (250°F) kadar iyi sıcaklık ve nem özellikleri elde edilir. HexPly M91, özellikle otomatik işleme için tasarlanmıştır ve hem otomatik bant dökme (ATL) hem de gelişmiş fiber yerleştirme (AFP) için uygundur. İyi yapışma ömrü ve kullanım ömrü, atölyede işleme sırasında esneklik sağlar ve düşük ekzoterm davranışı, 70 mm'ye (2.76") kadar kalın monolitik yapıların basit kürlenme döngülerine olanak tanır [3].

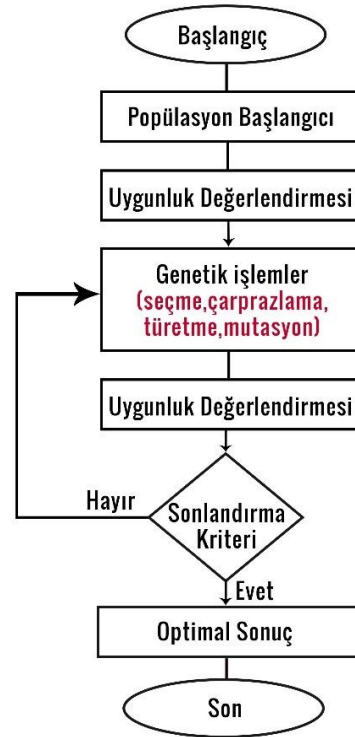
Kompozit malzemelerde yapılan tercih konfigürasyonları sayesinde ağırlık sabit tutularak performans veya isterlere göre ağırlık optimize edilebilir. Sadece katman dizilim sırasını değiştirerek yapılan optimizasyon en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Optimizasyon, sayısız dizilim arasından aynı ağırlığa sahip en iyi dizilimi bulmamızı veya aynı yükleri karşılayan en düşük ağırlığı bulmamızı sağlar. Kompozit katman dizilimi problemleri, türev hesaplamaları gibi analitik yöntemler ile çözülmesi neredeyse imkânsız olduğundan ve büyük hesaplamalar gerektirdiğinden dolayı geleneksel optimizasyon teknikleri ile çözülmesi araştırmacılar tarafından tercih edilmez.

Modern optimizasyon tekniklerinde kompozit katman dizilimi problemleri çözülürken seçilen ilk dizilimden başlayarak iteratif olarak oluşturulan dizilimler ile optimum dizilim bulunmaya çalışılır. Bu nedenle seçilen başlangıç noktasının optimum dizilime yakınlığı oldukça önemlidir. Optimizasyonun başarısı ilk dizilimin başarısına bağlıdır. Bazı optimizasyon teknikleri yerel optimum noktalarda takılı kaldığından dolayı farklı başlangıç noktalarından başlayarak algoritmayı birden çok defa kullanmak gerekir. Bu nedenle başlangıç noktasına duyarlı olmayan ve geniş bir çözüm uzayında arama yapabilen stokastik optimizasyon tekniklerinden birini kullanmak en doğrusudur. Genetik algoritma (GA) en çok tercih edilen stokastik optimizasyon tekniklerindedir. Yerel optimumlara takılı kalmasa da başlangıç noktasının sonuca uzaklığına göre genetik algoritmanın hızı değişebilir.

Bu çalışmada sonuca daha yakın başlangıç noktasından başlayarak algoritmanın hızını arttırmak için rastgele oluşturulan noktalardan elde edilen değerler büyükten küçüğe sıralanmış ve en büyük değer elde edildiği nokta başlangıç noktası olarak seçilmiştir. Bu işlem ile en iyi bireylerden en iyi çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu işleme ise elitizm adı verilir [4].

Genetik algoritmalar (GA) rastgele yapıları nedeniyle, tekrarlanan çalışmalarda alternatif optimumlar üretebilirler. Bu nedenle dizilim optimizasyonu için oldukça uygundurlar. Genetik algoritma fonksiyonunun süresiz, türevlenemez, stokastik veya yüksek oranda doğrusal olmadığı sorunları çözmek için kullanılabilir. GA küresel bir arama algoritması

kullanır ve tasarım uzayında tek nokta yerine bir tasarım popülasyonu kullanır. GA'da, genellikle popülasyon olarak adlandırılan bir dizi tasarım rastgele oluşturulur ve yinelemeler yoluyla (genellikle nesiller olarak adlandırılır) geliştirilir. Her nesilde, popülasyon, seçme, çaprazlama, mutasyon ve türetme gibi genetik operatörler kullanılarak dönüştürülür. Sonlandırma kriteri sağlandığında en iyi fonksiyon değerine sahip olan nesil çözüm olarak döndürülür. GA'lar, basit dikdörtgen plakalar, sandviç paneller, I-kesit kiriş, kutu kiriş, vb. gibi çeşitli kompozit yapılarda en uygun istifleme sırasını bulmak için birçok çalışmada kullanılmaktadır. GA'lar lamine kompozitlerin açılı dizilimi optimizasyonu için en popüler tekniklerden biridir. GA'ların performansı büyük ölçüde popülasyon büyüklüğüne ve genetik operatörleri kontrol eden parametrelere bağlıdır. GA'nın performansı ve güvenilirliği, genetik operatörler için dikkatli parametre seçmekle ve bellek tekniği kullanmakla geliştirilebilir.



Şekil 2. Genetik algoritma şeması [5].

Küresel enerji krizi ve çevre kirliliği, ulaşım endüstrisini ulaşım uygulamalarında daha hafif ve daha sağlam yapıları benimsemeye yönlendirmektedir [6]. Özellikle havacılık ve uzay sektöründe daha hafif malzemelerin kullanılması maliyetleri ciddi anlamda düşürmektedir. Fakat malzemelerde aranan tek özellik hafif olması değildir. Bunun yanında malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde istenilen düzeyde olması gereklidir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ve özellikle kullanımı yaygınlaşan kompozit malzemelerin burkulma yükü kapasitesinin bilinmesi malzemelerin tasarımı için de çok önemlidir [7].

Burkulma, düzlem içi basınç yüklerine maruz kalan ince ve büyük kompozit plakalar için kritik bir hasar modudur.

Kompozit levhaların burkulma yükü maksimizasyonu problemi yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmiştir [8].

Araştırmacıların bu alanda yaptığı çalışmalar 70'li yıllarda başlamış olup günümüze kadar gelişerek devam etmiştir. 70'li yıllarda Chao ve Koh [9] ve Hirano'da [10], sabit katman sayısına yani sabit ağırlığa sahip basit destekli kompozit levhanın farklı yük durumlarında ve uzunluk- genişlik oranında burkulma optimizasyonunun araştırmasını yapmışlardır.

Genetik algoritma yöntemi kullanılarak bu araştırmaların yapılması ise 90'lı yıllarda başlamıştır. Le Riche ve Haftka [11, 12] dikdörtgen bir kompozit laminatın katman tasarımı için daha önce tasarlanan bir genetik algoritmayı geliştirmiş ve böylece burkulmaya ve gerilmelere dayanan ince simetrik ve dengeli laminatlar elde etmişlerdir. Farklı genetik operatörlerin bir arada kullanılmasının algoritmayı iyileştirdiğini ileri sürmüşlerdir.

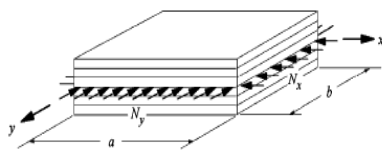
Karakaya ve Soykasap [13], düzlem içi sıkıştırma yüklerine sahip bir grafit/epoksi kompozit panelin katman dizilimi optimizasyonu genetik algoritma ve geliştirilmiş örüntü arama algoritması kullanarak çeşitli yük durumları ve en boy oranları için yapmışlardır. İncelenen kompozit plaka, dört taraftan basit bir şekilde desteklenen 64 katmanlı bir grafit/epoksi laminattır. Farklı küresel optimum dizilimleri bulmak için genetik algoritmanın geliştirilmiş örüntü arama algoritmasından daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmanın temel amacı, M91/IM10 prepreg plakasının burkulma optimizasyonunu genetik algoritma yöntemiyle yapmakla birlikte mekanik özellikleri bilinen çeşitli kompozit malzemeler için daha doğru sonuçları verecek ihtiyaca göre özelleştirilebilir optimizasyon algoritması geliştirmektir. Yapılan çalışma Karakaya ve Soykasap'ın [13] grafit epoksi malzemesi için yaptığı çalışmanın sonuçları ile de karşılaştırılarak aynı yüklemeye ve aynı geometrik yapıya sahip grafit/epoksi ve M91 kompozit malzemelerinin kritik burkulma yük faktörlerindeki değişimler incelenmektedir.

Katman dizilimi değiştirilerek yapılacak optimizasyonda kompozit malzemenin üretim maliyetinin düşürülmesi için katman açıları sınırlandırılmıştır. Optimizasyon uygulaması MATLAB kullanılarak yapılmıştır. Plakanın maksimum burkulma yük faktörü, farklı yük durumları ve farklı en boy oranları için elde edilmiştir.

2 Problem tanımı

Söz konusu kompozit panel, a uzunluğunda ve b genişliğindedir ve dört tarafından basitçe desteklenmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. İki eksenli basınç yükleri altında simetrik bir laminat [14].

Panel, sırasıyla x ve y yönlerinde verilen düzlem içi N_x ve N_y basma yüklerine tabidir. $N_x/N_y=k$ yük oranıdır. Laminat simetriktir, orta düzlemde dengelidir ve her biri t kalınlığında katmanlardan yapılmıştır. Yükler $\lambda_b N_x$ ve $\lambda_b N_y$ değerlerine ulaştığında laminat sırasıyla x ve y yönünde m ve n yarı dalgalar halinde bükülür. λ_b , eğilme sertlikleri D_{ij} cinsinden tanımlanan yük genliğidir ve burada r, uzunluğun genişliğe oranı, a/b olarak tanımlanan plaka en-boy oranıdır. Yük genliğini veren formülasyon Denklem (1)'de gösterilmiştir.

$$\lambda_b(m, n) = \pi^2 \left[\frac{m^4 D_{11} + 2(D_{12} + 2D_{66})(rmn)^2 + (rn)^4 D_{22}}{(am)^2 N_x + (ran)^2 N_y} \right] \quad (1)$$

Laminatın burkulmadan dayanabileceği maksimum yükü sınırlayan kritik burkulma yükü faktörü λ_{cb} 'nin, herhangi bir çift (m,n) altında λ_b 'nin en küçük değeri olduğu Denklem (2)'de gösterilmiştir. Burkulmayı önlemek için kritik yük faktörü en az birden büyük olmalıdır.

$$\lambda_{cb} = \min \lambda_b(m, n) \quad (2)$$

(m,n) = 2 almanın, burkulma yük kapasitesinin iyi bir tahminiyle sonuçlandığı gösterilmiştir. Buna göre $\lambda(1, 1)$, $\lambda(1, 2)$, $\lambda(2, 1)$ ve $\lambda(2, 2)$ 'nin en küçüğü kritik burkulma yükü olarak alınmıştır [14].

Optimizasyon problemi, M91/IM10 prepreg malzemesinden imal edilmiş panelin maksimum kritik burkulma yük faktörünün (λ_{cb}) optimum konfigürasyonunu bulmaktır. Tablo 1'de mekanik özellikleri verilen her katmanı 0,184 mm kalınlığındaki M91/IM10 tek yönlü prepreg kompozit malzemesi kullanılarak a=50,8 cm genişliğinde $N_x=1000$ N/mm yüklemesine sahip kompozit panelin Tablo 2'deki en boy oranı ve yük oranı koşullarına göre belirli açı diziliminde ve katman sayısında en yüksek burkulma yük faktörünü sağlayan optimum katman dizilimi ve kritik burkulma faktörü değerleri bulunacaktır.

Tablo 1. M91/IM10 tek yönlü prepreg kompozit malzemesinin mekanik özellikleri [15].

Özellik	Birim	Değer
Elastisite modülü - E1	GPa	176
Elastisite modülü - E2	GPa	15
Kesme modülü - G12	GPa	5.6
Poisson oranı - ν_{12}	-	0.27
Katman kalınlığı - t	mm	0.184

Tablo 2. Kompozit plaka koşulları

Koşullar	En Boy Oranı (r)	Yük Faktörü (k)
Koşul 1	2	1
Koşul 2	1	1
Koşul 3	1/2	1
Koşul 4	2	2
Koşul 5	1	2
Koşul 6	1/2	2
Koşul 7	2	1/2
Koşul 8	1	1/2
Koşul 9	1/2	1/2

Bulunan sonuçlar **Tablo 3**'te özellikleri verilen grafit epoksi kompozit malzemesinin kritik burkulma faktörü değerleri ile karşılaştırılacaktır. Epoksiler, gelişmiş yük taşıma kabiliyetleri ile açık deniz, ulaşım ve sivil altyapılarda en çok tercih edilen termoset yapıştırıcılar arasındadır [6]. Karbon fiberler ile epoksi reçinenin birleştirilmesi ile yüksek mekanik özelliklere sahip grafit/epoksi malzemesi ortaya çıkmaktadır.

Tablo 3. Grafit/epoksi kompozit malzemesinin mekanik özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Elastisite modülü - E1	GPa	127.59
Elastisite modülü - E2	GPa	13.03
Kesme modülü - G12	GPa	6.41
Poisson oranı - ν_{12}	-	0.28
Katman kalınlığı - t	mm	0.127

3 Problem analizi

Karakaya ve Soykasap'ın [13] **Tablo 3**'te özellikleri verilen epoksi reçinesi ve karbon takviyesinden oluşan grafit/epoksi kompozit malzemesi için 64 katman ve (0)₂, (± 45), (90)₂ fiber açıları ile yaptığı çalışma M91/IM10 prepreg malzemesi için aynı açı dizilimi ve katman sayısı kullanılarak ve Matlab ile yazılan GA kodu çalıştırılarak yapılmıştır. Çalışmaların karşılaştırmaları **Tablo 4**'te gösterilmiştir. Karakaya ve Soykasap'ın [13] yaptığı çalışma incelendiğinde açılardan tekli [(0) (45) (90)] veya çiftli [(0)₂ (± 45) (90)₂] kullanılmasıyla hemen hemen aynı maksimum burkulma yük faktörü değerini verdiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle üretim kolaylığı nedeniyle açılardan çiftli kullanımını tercih etmenin daha doğru olduğu değerlendirilmektedir.

Çalışmanın amacı sadece daha önce yapılan çalışmalarını yeni nesil M91/IM10 prepreg malzemesi için tekrar etmek değildir aynı zamanda bu çalışmayla birlikte mekanik özellikleri bilinen çeşitli kompozit malzemelerde kullanılacak, daha doğru sonuçları verecek ve açı çeşidi, nesil sayısı, burkulma yük faktörü sınırı gibi parametreleri değiştirerek ihtiyaca göre özelleştirilebilir algoritma geliştirmektir. Algoritmayı oluştururken genetik algoritmadan yararlanılmıştır. Algoritmanın küresel optimum noktaları tek seferde bulabilmesi için algoritmaya elitizm eklenmiştir. Elitizm ile rastgele nesiller sıralanır ve en iyi sonucu veren nesilden algoritma devam ettirilir. Elitizm için seçilen rastgele nesil sayısı önemlidir. Az nesil seçildiği zaman küresel optimumu bulmak için daha fazla yineleme yapılması gerekebilir. Fazla nesil sayısı seçildiği zaman ise algoritma yavaşlayacaktır. Katman sayısı da nesil sayısının seçiminde önemli bir parametredir. Katman sayısı arttıkça elitizmde sıralanacak nesil sayısının artırılması daha hızlı sonuca ulaşmayı sağlar. Elitizm sonrasında seçilen nesille çarpazlama ve mutasyon operatörleri uygulanarak küresel optimumlar bulunmaya çalışılır. Algoritma bir süre sonra parametre olarak girilen açı değerleriyle değil onların arasından seçilen küresel optimum noktayı bulmayı sağlayacak açı değerleri ile devam eder. Algoritma işine yaramayacak açı değerlerini mutasyon ve çarpazlama operatörü olarak uygulamayacak şekilde programlanmıştır.

Algoritmaya aynı zamanda burkulma yük faktörü sınırı da değiştirilebilir olarak eklenmiştir. Algoritmadan çıkan burkulma yük faktörü değerleri algoritmaya girilen burkulma yük faktörü sınırı parametresinden büyük olana kadar algoritma çalışır. Program yineleme sayısı sonunda istenen sonucu bulamamışsa istenen sonucu bulana kadar katman sayısını 4 arttırarak çalışmaya devam eder. Daha fazla küresel optimum nokta bulabilmek için algoritmada parametre olarak 64 katman için 10000 yineleme sayısı ile 300 nesil sayısı, 44 katman için 1000 yineleme sayısı ile 150 nesil sayısı girilmiştir. Algoritma genellikle 64 katman için 600 yinelemenin altında, 44 katman için 300 yinelemenin altında küresel optimum noktalardan birisine ulaşmıştır.

Tablo 4. Grafit/epoksi ve M91/IM10 kompozit malzemelerinin 64 katmandaki kritik burkulma yükleri

Koşullar	Grafit/epoksi λ_{cb}	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	695 781	2 809 364
Koşul 2	242 823	1 000 287
Koşul 3	173 945	702 341
Koşul 4	1 057 948	4 289 822
Koşul 5	323 764	1 333 716
Koşul 6	206 493	825 323
Koşul 7	412 986	1 662 095
Koşul 8	161 882	666 858
Koşul 9	132 244	536 229

M91/IM10 kompozit malzemesinin 64 katmanda, farklı yük ve en boy oranlarına göre maksimum burkulma yük faktörleri bazen birkaç farklı açı dizilimi ile sağlanmıştır. Çok sayıda küresel optimum olduğunda kat dizisinde minimum değişiklik ve dolayısıyla üretim kolaylığı sunan açı dizilimi tercih edilmiştir. Farklı koşullara göre aynı maksimum yük faktörü değerini veren küresel optimum noktalardan bir tanesi seçilerek **Tablo 5** oluşturulmuştur.

Tablo 5. M91/IM10 prepreg malzemesinin 64 katmandaki optimum katman dizilimi tablosu

Koşullar	Açı Dizilimi	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	$[\pm 45_1/90_{14}/\pm 45_4/90_2/\pm 45_2/90_2]_s$	2 809 364
Koşul 2	$[\pm 45_{16}]_s$	1 000 287
Koşul 3	$[\pm 45_1/0_{14}/\pm 45_4/0_2/\pm 45_2/0_2]_s$	702 341
Koşul 4	$[\pm 45_3/90_6/\pm 45_1/90_{12}/\pm 45_1/90_4]_s$	4 289 822
Koşul 5	$[\pm 45_{16}]_s$	1 333 716
Koşul 6	$[0_{14}/\pm 45_1/0_4/\pm 45_4/0_4]_s$	831 048
Koşul 7	$[90_{14}/\pm 45_1/90_4/\pm 45_4/90_4]_s$	1 662 095
Koşul 8	$[\pm 45_{16}]_s$	666 858
Koşul 9	$[\pm 45_1/0_2/\pm 45_2/0_8/\pm 45_3/0_2/\pm 45_4]_s$	536 229

Grafit/epoksi kompozit malzemesinin bir katmanı 0,127 mm, M91/IM10 prepreg malzemesinin bir katmanı 0,184 mm kalınlığındadır. Aradaki kalınlık farkından dolayı aynı katman sayılarında değil aynı kalınlıklarda karşılaştırılması daha doğru karşılaştırma yapılmasını sağlar.

Grafit/epoksi kompozit malzemesi 64 katmanla 8,128 mm kalınlığında iken M91/IM10 prepreg malzemesi 44 katmanla 8,096 mm kalınlığındadır. Bu sebeple burkulma analizi 44 dizilime göre tekrar yapılarak karşılaştırmalı sonuçları **Tablo 6**'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Yaklaşık kalınlıklardaki grafit/epoksi ve M91/IM10 prepreg malzemelerinin kritik burkulma yükleri

Koşullar	Grafit/epoksi λ_{cb}	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	695 781	912 809
Koşul 2	242 823	325 044
Koşul 3	173 945	228 202
Koşul 4	1 057 948	1 393 713
Koşul 5	323 764	433 393
Koşul 6	206 493	269 764
Koşul 7	412 986	539 528
Koşul 8	161 882	216 696
Koşul 9	132 244	174 214

M91/IM10 prepreg malzemesinin 44 katmanda, farklı yük ve en boy oranlarına göre maksimum burkulma yük faktörleri bazen birkaç farklı açı dizilimi ile sağlanmıştır. Çok sayıda küresel optimum olduğunda kat dizisinde minimum değişiklik ve dolayısıyla üretim kolaylığı sunan açı dizilimi tercih edilmiştir. Farklı koşullara göre aynı maksimum yük faktörü değerini veren küresel optimum noktalardan bir tanesi seçilerek **Tablo 7** oluşturulmuştur.

Tablo 7. M91/IM10 prepreg malzemesinin 44 katmandaki optimum katman dizilimi tablosu

Koşullar	Açı Dizilimi	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	$[90_6/\pm 45_3/90_8/\pm 45_1]_s$	912 809
Koşul 2	$[\pm 45_{11}]_s$	325 044
Koşul 3	$[0_6/\pm 45_3/0_8/\pm 45_1]_s$	228 202
Koşul 4	$[\pm 45_1/90_2/\pm 45_1/90_2/\pm 45_1/90_4/\pm 45_1/90_6]_s$	1 393 713
Koşul 5	$[\pm 45_{11}]_s$	433 393
Koşul 6	$[0_{10}/\pm 45_1/0_2/\pm 45_1/0_2/\pm 45_2]_s$	269 764
Koşul 7	$[90_{10}/\pm 45_1/90_2/\pm 45_1/90_2/\pm 45_2]_s$	539 528
Koşul 8	$[\pm 45_{11}]_s$	216 696
Koşul 9	$[\pm 45_2/0_6/\pm 45_1/0_4/\pm 45_1/0_4]_s$	174 214

Maksimum burkulma yük faktörünü veren açı dizilimleri incelendiğinde en boy oranı değerlerine göre popülasyonu oluşturan $(0)_2$, (± 45) , $(90)_2$ açılarından hepsinin maksimum burkulma yük faktörünü veren sonuçlar arasında yer almadığı gözlemlenmiştir. Yani oluşturulan algoritma en boy oranı koşuluna göre en iyi sonucu verecek açıları kullanarak diğer açı veya açıları elimine etmiştir. Bu çalışmada kullanılan en boy oranları için maksimum burkulma yük faktörü değerine ulaştıran optimum açılar ve elimine edilen açılar **Tablo 8**'de gösterilmiştir.

Tablo 8. En boy oranına göre optimumu sağlayan açılar ve elimine edilen açılar

En Boy Oranı	Optimumu Sağlayan Açılar	Elimine Edilen Açılar
2	$[(\pm 45) (90)_2]$	0
1	$[(\pm 45)]$	0-90
1/2	$[(0)_2 (\pm 45)]$	90

Plakanın x ve y eksenlerindeki düzlem içi yükler dengeli olduğu zaman en boy oranının a/b'den b/a dönüşmesi plakanın koordinat düzleminde döndürülmesi ile aynı şeyi ifade eder. Bu nedenle yük oranı 1 iken en boy oranı 2'ye göre yapılan analizlerdeki 90 açılarının 0 ile

değiştirilmesinin en boy oranı 1/2 deki maksimum burkulma dizilimini vermektedir.

4 Sonuçlar ve tartışma

M91/IM10 tek yönlü prepreg malzemesinden üretilmiş bir panelin farklı açı dizilimlerine sahip konfigürasyonlarından maksimum burkulma kapasitesinin elde edildiği konfigürasyonu bulmak için Matlab yazılımı aracılığıyla genetik algoritma yöntemi kullanılarak oluşturulan Matlab kodu kullanılmıştır. 64 ve 44 katmanları için çalışma yapılan M91/IM10 panelin simetrik ve dengeli olduğu kabul edilmiştir. Genetik algoritma küresel (global) bir arama algoritmasıdır. Başlangıç noktasının daha iyi seçilmesine yardımcı olan elitizm sayesinde daha doğru sonuçlar algoritma tek sefer çalıştırılarak alınmıştır. Sonuçların küresel optimum (en iyi değer) olduğunun kontrolü için algoritma birden fazla defa çalıştırılarak aynı sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Küresel optimumlar, farklı yük durumları ve farklı panel en boy oranları için başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Literatürde yer alan burkulma yükü optimizasyon problemi için yapılan çalışma literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Üretim kolaylığı açısından düşünülerek sınırlı açılar çift dizimli olacak şekilde algoritmanın çalıştırılması uygun bulunmuştur. Bu nedenle $(0)_2$, (± 45) , $(90)_2$ fiber açıları kullanılarak 0.5, 1, 2 düzlem içi yük oranlarında ve 0.5, 1, 2 en boy oranlarında sayısal incelemeler yapılmıştır. Bazı koşullarda yalnızca bir küresel optimum bulunurken bazı koşullarda birçok küresel optimum bulunmuştur. Çok sayıda küresel optimum olduğunda kat dizisinde minimum değişiklik ve dolayısıyla üretim kolaylığı sunan açı dizilimi tercih edilmiştir. Algoritmaların etkinliği parametrelerin seçimine bağlıdır. Üretim kolaylığını düşünerek seçimler yapmak algoritmanın daha iyi sonuçları daha kısa sürede bulmasını sağlar. M91/IM10 prepreg malzemesinin grafit/epoksi malzemesi ile aynı katman sayısında karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda M91/IM10'un daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. M91/IM10 ve grafit/epoksi'nin bir katmanının kalınlıkları birbirinden farklı olduğu için grafit epoksinin 64 katmanıyla yaklaşık olarak aynı kalınlıkta olan M91/IM10'un 44 katmanı karşılaştırılmıştır. M91/IM10'un 44 katman ile 64 katmanla oluşturulan grafit/epoksi'den daha iyi performans gösterdiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Az katman sayısı M91/IM10'un üretim kolaylığı açısından da daha iyi olduğunu göstermektedir. Algoritma ile grafit/epoksi ile aynı kalınlığa sahip M91/IM10'un daha büyük burkulma yükü kapasitesine sahip tasarımları bulunabilmiştir. En boy oranlarına göre en iyi sonucu veren açı kümelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Örneğin en boy oranı 1 iken popülasyonda $(0)_2$, (± 45) , $(90)_2$ açıları yer almasına rağmen en iyi sonuç sadece (± 45) açılarından oluşmaktadır. 0 ve 90 açıları en iyi sonuçta yer almamaktadır. Farklı en boy oranlarında farklı açı kümelerinin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucu M91/IM10 prepreg malzemesinin burkulma dayanımı ve üretim kolaylığından dolayı havacılık ve otomotiv alanında tercih edilebilir bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] M. Özer, H. Ulus ve H.B. Kaybal, Enhanced out-of-plane loading performance of multi-scale glass/epoxy composites doped with HNT. IJPTTE Vol. 02, No.01, pp. 99-102, 2023. <https://doi.org/10.56158/ijpte.2023.2.2.01>
- [2] M91 Composite Trend, HexPly M91 Prepreg Performans Grafiği. https://www.hexcel.com/user_area/uploads/HexPly_M91_Composite_Trend.pdf, Erişim 15 Haziran 2023.
- [3] M91 Prepreg, HexPly M91 Prepreg Hakkında Bilgi. <https://www.hexcel.com/About/Technology-Breakthroughs/HEXPLY-M91-Prepreg?showmodal=1>, Erişim 15 Haziran 2023.
- [4] E.U. Ergül, Çok amaçlı genetik algoritmalar: temelleri ve uygulamaları. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2010.
- [5] A. Bhujbal, Optimization of composite stacking sequence using mesh adaptive direct search. Yüksek Lisans Tezi, Department of Mechanical Engineering McGill University, Montréal, Kanada 2017.
- [6] H. Ulus, H.B. Kaybal, F. Cacık, V. Eskizeybek and A. Avcı, Fracture and dynamic mechanical analysis of seawater aged aluminum-BFRP hybrid adhesive joints. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 268, 2022, Article 108507. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108507>.
- [7] G. Adabaşı, Stacking sequences optimization of laminated composites for maximum buckling strength by stochastic search methods. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Institute of Technology, Urla, İzmir, 2020.
- [8] H.A. Deveci, L. Aydın and H.S. Artem, Buckling Optimization of Composite Laminates Using a Hybrid Algorithm Under Puck Failure Criterion Constraint. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 0(0), 1–15, 2016. <https://doi.org/10.1177/0731684416646860>.
- [9] C. C. Chao, S. L. Koh and C. T. Sun, Optimization of Buckling and Yield Strengths of Laminated Composites. AIAA Journal, Vol. 13, No. 9, pp. 1131-1132, 1975. <https://doi.org/10.2514/3.60515>.
- [10] Y. Hirano, Optimum Design of Laminated Plates under Axial Compression. AIAA Journal, Vol. 17, No. 9, pp. 1017-1019, 1979. <https://doi.org/10.2514/3.61269>.
- [11] R. T. Haftka and R. Le Riche, Optimization of laminate stacking sequence for buckling load maximization by genetic algorithm. AIAA J. 31(5): p. 951-956, 1993. <https://doi.org/10.2514/3.11710>.
- [12] R. Le Riche and R. T. Haftka, Improved Genetic Algorithm For Minimum Thickness Composite Laminate Design. Composites Engineering, 5(2): p. 143- 161, 1995. [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(95\)90710-S](https://doi.org/10.1016/0961-9526(95)90710-S).
- [13] Ş. Karakaya and Ö. Soykasap, Buckling optimization of laminated composite plates using genetic algorithm and generalized pattern search algorithm. Struct Multidisc Optim, 39, 477–486, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0344-2>.
- [14] Ö. Erdal and F.O. Sönmez, Optimum Design Of Composite Laminates For Maximum Buckling Load Capacity Using Simulated Annealing. Composite Structures, 71, 45–52, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.09.008>.
- [15] S. Gup, J. E. Monteros and Y. Liu, Gust Alleviation of a Large Aircraft with a Passive Twist Wingtip. Aerospace, 2, 135-154, 2015. <https://doi.org/10.3390/aerospace2020135>.





Karbon ayak izi tespiti: Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi örneği

Determination of carbon footprint: The case of Osmaniye Korkut Ata University

Ali Burak Yavuz¹ , Osman Kara² , Bülent Yanıktepe^{3,*} 

¹ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, 80750, Osmaniye, Türkiye

^{2,3} Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye, Türkiye

Öz

Dünya nüfusunun artması ve teknolojik gelişmelerin hızlanması ile günlük tüketim ihtiyaçlarımız değişiklik göstermeye başlamıştır. Özellikle fosil yakıt ve elektrik tüketimine doğru yönelim artmıştır. Artan enerji tüketimleri sonucunda dünyamızda küresel ısınma ve iklim değişikliği konuları bir tehdit haline gelmiştir. Bu kapsamda birçok hükümet sera gazı ile mücadele etmek ve zararlı etkilerini en aza indirmek için tedbirler almaya başlamıştır. Bu çalışmada Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Karacaoğlan yerleşkesinin karbon ayak izi hesaplanmıştır. Hesaplamalar 14064-1 standardı ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Ulusal Sera Gazı Envanteri Yönergelerinden elde edilen emisyon faktörleri baz alınarak yapılmıştır. Hesaplamalarda 2019, 2020 ve 2021 yıllarındaki tüketim verileri kullanılmıştır. 2019 yılında kapsam-1 ve kapsam-2 emisyonları toplamı 2955.30 ton CO_{2e}, 2020 yılında 1913.96 ton CO_{2e} ve 2021 yılında ise 2659.14 ton CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. COVID-19 tedbirleri sonucunda 2020 yılında uzaktan eğitime geçiş dönemiyle özellikle fosil yakıtlardan kaynaklı emisyon oranlarında önemli bir azalış olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Karbon ayak izi, Sera gazı emisyonları, IPCC

1 Giriş

Dünya nüfusunun artması ve teknolojik gelişmeleriyle günümüzde bireylerin tüketim miktarları ve yönelimleri değişmektedir. Tüketimdeki bu hızlı değişim küresel ısınma, iklim değişikliği ve karbon ayak izi gibi kavramların ortaya çıkmasında büyük bir etken olmuştur. İklim değişikliği ve karbon ayak izini azaltmaya yönelik çalışmalarda ise genellikle enerji verimliliği uygulamaları üzerinde durulmaya başlanmıştır [1]. Ülkemizde dahil olmak üzere birçok ülke iklim değişikliğine karşı tepki oluşturmak ve küresel emisyonları azaltmak için Paris İklim Anlaşmasını kabul etmiştir [2]. Paris İklim Anlaşmasına göre birçok ülke küresel emisyonların azaltılması hususunda ulusal ve uluslararası ölçekte önemli tedbirler olarak 2050 yılına kadar sıfır emisyonu hedeflemektedir [3]. Bu kapsamda ülkemizde 2030 yılına kadar fosil yakıt kullanımını azaltma, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme gibi önlemler alınarak 2053 için sıfır emisyon hedefini belirlediğini açıklamıştır [4]. Türkiye'nin sera gazı emisyon miktarı

Abstract

The increase in global population and the acceleration of technological advancements have led to changes in our daily consumption needs. In recent years, there has been an increase in fossil fuel use and electricity consumption. As a result of increasing energy consumption, global warming and climate change problems have become a threat in our world. In this context, many governments have begun taking measures to combat greenhouse gases and minimize their harmful effects. In this study, the carbon footprint of the Osmaniye Korkut Ata University Karacaoğlan settlement was calculated. The calculations are based on emission factors from Standard 14064-1 and the National Guidelines for Greenhouse Gas Inventories of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The calculations used consumption data for 2019, 2020 and 2021. The sum of scope-1 and scope-2 emissions in 2019 was calculated as 2955.70 tons of CO_{2e}, 1913.96 tons of CO_{2e} in 2020 and 2659.14 tons of CO_{2e} in 2021. As a result of COVID-19 measures, a significant decrease in emissions from fossil fuels has been observed in 2020, with the transition period to distance education.

Keywords: Carbon footprint, Greenhouse gas emission, IPCC

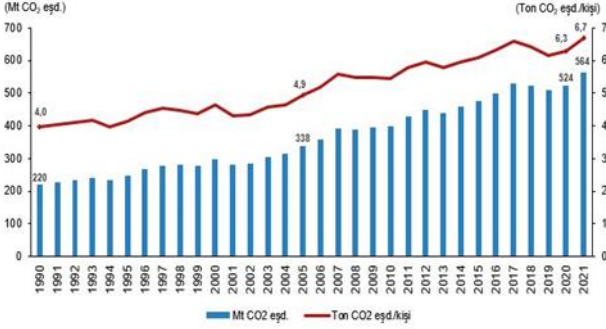
düzenli olarak T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hesaplanmaktadır [5]. Hesaplama verileri ve sonuçları ulusal sera gazı envanter raporunda yayınlanmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumunun en son yayınladığı rapora göre Türkiye'nin 2020 yılı karbon ayak izi 523.9 Mt CO_{2e} olarak hesaplanmıştır [6]. Türkiye'nin sera gazı emisyonları 2000'li yıllardan sonra hızlı bir oranla artmaya başlamıştır. Türkiye'nin 1990-2020 yılları arasındaki hesaplanan sera gazı emisyonları Şekil 1'de gösterilmiştir [7].

Sera gazı emisyonlarının hızlı bir oranla artması sonucu ve sıfır emisyon hedefine ulaşmak için birçok kurum ve kuruluşlarda küresel emisyonları azaltmak için gerekli tedbirler almaya başlamıştır. Bu kapsamda kurum ve kuruluşlar sera gazı emisyonlarını değerlendirmek amacı ile karbon salınımlarını hesaplayarak sera gazı envanter raporlarını hazırlamaktadır [8].

Karbon ayak izi doğrudan karbon emisyonları ve dolaylı karbon emisyonları olmak üzere iki grupta incelenmektedir

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: byaniktepe@osmaniye.edu.tr (B. Yanıktepe)
Geliş / Received: 14.07.2023 Kabul / Accepted: 16.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1327500

[9]. Doğrudan karbon emisyonları fosil yakıt tüketiminden kaynaklı emisyonları ve enerji tüketiminden kaynaklı emisyonları kapsamaktadır. Doğrudan emisyonlar kapsam 1 ve kapsam 2 emisyonları olarak iki kategoride bulunmaktadır. Kapsam 1 emisyonları fosil yakıtlardan kaynaklı emisyonları, iklimlendirme ve yangın tesisatı sistemlerinde oluşan kaçak gazlardan meydana gelen emisyonları, ürün ve atık su kaynaklı emisyonları kapsarken kapsam 2 emisyonları elektrik tüketiminden kaynaklı emisyonları kapsamaktadır [10].



Şekil 1. Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonu [7]

Dolaylı karbon emisyonları ise ürün, mal veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca yaptığı emisyonları ele almaktadır [11]. Karbon ayak izi ton karbondioksit eşdeğeri olarak veya birim başına düşen karbondioksit eşdeğeri olarak hesaplanmaktadır. Doğru bir sera gazı envanter raporu sürdürülebilir kalkınmaya yönelik ilerleme miktarını tespit etmek için kilit unsurlardan biridir [12]. Çevresel endişelerin azaltılması ve sürdürülebilir kalkınmaya doğru adımlar ile ilerlemek için özellikle yükseköğretim kurumlarına çok önemli görevler düşmektedir [13]. Yüksek öğretim kurumlarında öğrenci, personel ve akademisyenlerin sürdürülebilirlik ilkelerinin “örnek olma” entegrasyonu sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır [14]. Bu durum yükseköğretim kurumlarının üstlenmesi gereken sorumluluklar üzerinde daha kapsamlı bir beklentiye neden olmaktadır [15]. Ancak yükseköğretim kurumları sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için kolaylaştırıcı etken olarak gözükmese de kişi başına düşen emisyon miktarları ciddi bir seviyede yer almaktadır [16]. Özellikle ulaşım amaçlı kullanılan araçların petrol bazlı yakıtlar olması ve bu yakıtların yanması sonucu oluşan emisyonlar toplam sera gazı emisyonlarında önemli bir paya sahiptir [17]. Bu yüzden üniversitelerin karbon etkilerine yönelik araştırmalar hızla yapılmaya başlanmıştır [18]. Üniversitelerde karbon emisyonlarının hesaplanması, raporlanması ve karbon emisyonunu azaltmaya yönelik çalışmalar birçok kurum üzerinde hesaplamalardaki şeffaflığın artırılması ve alınacak tedbirler açısından farklı bir bakış açısı kazandırmaktadır [19].

Literatürde sera gazı emisyonları ve iklim değişikliği hakkında birçok araştırma yapıldığı görülmektedir. Fouladvand vd. [20] yaptıkları çalışmada, bir haber kuruluşunun karbon emisyonlarını incelemiştir. Haber yayın kuruluşunun yıllık emisyonunun 235.28 ton CO_{2e} olduğunu hesaplamışlardır. Yıllık emisyon dağılımında en

büyük paya sahip etkenin ulaşım kaynaklı olduğunu ve dağılımın yüzde 64.6'sını oluşturduğunu, bu yüzden karbon emisyonlarının azaltılması için evden çalışma saatlerinin arttırılması ve dış kaynak kullanımının azaltılması gibi önlemlerin alınması gerektiğini tespit etmişlerdir. Cooper vd. [21] yaptıkları çalışmada, Imperial College London Kimya Mühendisliği Bölümünün karbon ayak izini kapsam 1, kapsam 2 ve kapsam 3 emisyonları olarak üç grupta incelemiştir. Karbon ayak izinin 2019 yılında 7620 ton CO_{2e} ve 2020 yılında ise 8330 ton CO_{2e} olduğunu hesaplamışlardır. Toplam emisyonların %46'sını kapsam 3 emisyonların, %46'sının ise kapsam 1 ve kapsam 2 emisyonlarının oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Syafrudin vd. [22] yaptıkları çalışmada Diponegoro Üniversitesinin karbon ayak izini hesaplamışlardır. Üniversitenin toplam karbon ayak izinin 16345.83 ton CO_{2e} olduğunu tespit etmişlerdir. Ologun ve Wara [23] yaptıkları çalışmada Federal Tarım Abeokuta Üniversitesinin 2011-2012 yılları arasında gerçekleşen karbon ayak izini incelemiştir. Üniversitenin karbon ayak izini yaklaşık 5935 ton CO₂ olarak hesaplamışlardır. Enerji tüketiminin karbon ayak izine etkisinin %65 ile en yüksek paya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yanez vd. [24] yaptıkları çalışmada Talca Üniversitesinin 2016 yılına ait karbon ayak izi miktarını üç kapsamda incelemiştir. Kapsam 1 kişi başına düşen yıllık emisyonu 20.03 ton CO_{2e}, kapsam 2 kişi başına düşen yıllık emisyonu 0.25 ton CO_{2e} ve kapsam 3 kişi başına düşen yıllık emisyonun ise 0.41 ton CO_{2e} olduğunu tespit etmişlerdir. Kiehle vd. [8] yaptıkları çalışmada, Oulu Üniversitesinin karbon ayak izi hesaplamasında girdi-çıkı analizi ve yaşam döngüsü değerlendirilmesi yaklaşımlarını içeren bir hibrit model kullanımını araştırmıştır. Oululu Üniversitesinin 2019 yılında toplam sera gazı emisyonunun 19.072 ton CO_{2e} olduğunu ve en yüksek emisyon payının kampüsteki ısı kullanımından kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Utaraskul [25] yaptığı çalışmada, Suan Sunandha Rajabhat Üniversitesi Çevre Bilimleri Programında bulunan 35 öğrencinin karbon ayak izini araştırmıştır. Sera gazı emisyonunun 2.16 ton CO_{2e}/yıl olduğunu hesaplamıştır. Öğrencilerin karbon ayak izinin 1.05 CO_{2e}/yıl elektrikli cihaz kullanımından, 0.7 ton CO_{2e}/yıl gıda tüketiminden, 0.4 ton CO_{2e}/yıl ulaşım kaynaklı olduğunu tespit etmiştir. Seyhan vd. [26] yaptıkları çalışmada, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesinin 2019 ve 2020 yılına ait karbon ayak izini incelemiştir. Tier-1 yaklaşımına göre 2019 yılına ait karbon ayak izinin 2753.2 ton CO_{2e} ve 2020 yılına ait karbon ayak izinin 2383.74 ton CO_{2e} olduğunu, DEFRA emisyon faktörleriyle yapılan hesaplamalarda ise 2019 yılına ait karbon ayak izinin 2314.53 ton CO_{2e}, 2020 yılına ait karbon ayak izinin ise 1826.54 ton CO_{2e} olduğunu hesaplamışlardır. İki hesaplama yöntemi arasında farklılıkların oluşmasında karbon emisyon faktörlerinin etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Güğül vd. [27] yaptıkları çalışmada, uzaktan eğitim ile örgün eğitimin karbon ayak izine etkilerini incelemiştir. Yüksek lisans öğrencilerinin tüketim verileri baz alınmıştır. Hesaplama sonucunda örgün eğitim döneminde öğrencilerin karbon ayak izinin 132.48 kg CO_{2e}, uzaktan eğitim döneminde ise öğrencilerin karbon ayak izinin 50.72 kg CO_{2e} olduğunu hesaplamışlardır. Yaka vd.

[28] yaptıkları çalışmada, Akdeniz Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulunun karbon ayak izini incelemişlerdir. Annex 2014 hesaplama kriterleri kullanılarak okulun karbon ayak izinin 98.3 ton CO_{2e} olduğunu hesaplamışlardır. Binboğa vd. [29] yaptıkları çalışmada, Manisa Celal Bayar Üniversitesinin karbon ayak izini incelemişlerdir. Üniversitenin karbon ayak izini IPCC tier 1 yaklaşımı ile hesaplamışlardır. Üniversitenin 2016 yılı karbon ayak izinin 8953.96 ton CO_{2e} olduğunu tespit etmişlerdir. Kumaş vd. [30] yaptıkları çalışmada Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bucak yerleşkesi yükseköğretim birimlerinin karbon ayak izini incelemişlerdir. Doğalgaz, elektrik, öğrenci ve personel ulaşımından kaynaklı karbon ayak izinin 217503 kg/yıl olduğunu tespit etmişlerdir. Kıyılmaz vd. [31] yaptıkları çalışmada gıda sektöründe dondurma üretimi yapan büyük ölçekli bir tesiste enerji tasarrufu konusunda verimlilik artırıcı uygulama ve projeler ile alacak önlemleri araştırmışlardır. 2019 yılı için tesiste yapılacak basit müdahaleler ile yıllık 929555 kWh enerji tasarruf edilebileceğini ve bu tasarrufa karşılık 1200733 kg CO₂ salınımının azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Akhan [32] yaptığı çalışmada sanayide pompa ve fan sistemlerinde enerji verimliliğini arttırmaya yönelik enerji yönetim uygulamalarını analiz etmiştir. Pompa debisinin büyük seçilip pompayı düşük debide çalıştırmanın tasarruf sağladığını tespit etmiştir. Ayrıca analiz sonucunda enerji verimliliği uygulamaları ile %60 enerji tasarruf sağlandığını hesaplamıştır.

Bu çalışma Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi (OKÜ) Karacaoğlan yerleşkesinin 2019,2020 ve 2021 yıllarına ait fosil yakıt tüketimi ve elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi miktarı hesaplanmıştır.

2 Materyal ve metot

OKÜ Karacaoğlan yerleşkesi karbon ayak izi Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) standartlarına göre hesaplanmıştır. OKÜ Karacaoğlan Yerleşkesi 471381.42 m² alan üzerinde bulunmakta olup 144938 m² kapalı alana ve 150000 m² yeşil alana sahiptir. OKÜ Karacaoğlan yerleşkesi Şekil 2’de gösterilmiştir [33].



Şekil 2. OKÜ Karacaoğlan yerleşkesi

Üniversite 2 adet Enstitü, 8 adet fakülde, 2 adet yüksekokul, 5 adet meslek yüksekokulu ve 9 adet araştırma merkezi ile eğitim-öğretim yapmayı sürdürmektedir [34]. OKÜ Karacaoğlan yerleşkesinde bulunan enstitü, fakülte, yüksekokul ve meslek yüksekokulunda bulunan öğrenci sayıları, akademik personel sayıları ve idari personel sayıları yıllara göre detaylı olarak Tablo 1’de gösterilmiştir [33,35,36].

Tablo 1. OKÜ Karacaoğlan yerleşkesi kişi sayıları

Yıllar	Öğrenci Sayıları	Akademik Personel Sayıları	İdari Personel Sayıları
2019	11271	494	341
2020	10837	542	347
2021	10929	556	352

Yerleşke içerisinde elektrik enerjisi yoğun olarak kullanılmaktadır. Sınıflar, ortak alanlar, çevre aydınlatması, teknolojik aletler ve özellikle iklimlendirme sistemlerinde elektrik tüketimi gerçekleşmektedir. İdari binalar ve kütüphanede bulunan veri bilgi sistemlerinde iklimlendirme sistemleri tüm gün boyunca aktif olarak çalışmaktadır. Yaz aylarında Osmaniye ilinin sıcak ikliminden kaynaklı iklimlendirme sistemlerinde elektrik tüketimi artmaktadır. Ayrıca kampüsün bazı bölgelerinde de ısınma amaçlı iklimlendirme sistemleri kullanılmaktadır. Yıllara göre elektrik tüketimi ve elektrik kullanım alanları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Elektrik tüketim miktarı ve kullanım alanları

Yıllar	Elektrik Tüketim Miktarı (kWh)	Elektrik Kullanım Alanları (m ²)
2019	5531593	209944
2020	3963707	144464
2021	5389514	172624

Yerleşke içerisinde doğalgaz ısınma amaçlı, kapalı havuzda ve yemekhanede kullanılmaktadır. Bazı sınıflarda, idari binalarda ve ortak alanlarda doğalgaz kullanımı mevcut olmasına rağmen Osmaniye ilinin iklim koşullarından dolayı çok fazla kullanılmamaktadır. Yıllara göre doğalgaz tüketimi ve kullanım alanları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Doğalgaz tüketim miktarı ve kullanım alanları

Yıllar	Doğalgaz Tüketim Miktarı (m ³)	Doğalgaz Kullanım Alanları (m ²)
2019	164120	209944
2020	33043	144464
2021	77155	172624

Yerleşke içerisinde ısınma ve yakma amaçlı Fuel-oil kullanımı mevcuttur. Fuel-oil tüketimi idari binalarda, yemekhanede ve atölyelerde yılın belli dönemlerinde kullanılmaktadır. Yıllara göre fuel-oil tüketimi ve kullanım alanları Tablo 4’te gösterilmiştir.

Motorin ve benzin tüketimi üniversiteye ait iş makineleri, ulaşım araçları ve jeneratörler tarafından kullanılmaktadır. Üniversiteye ait ulaşım araçları ve iş makineleri sayıları Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 4. Fuel-oil tüketim miktarı ve kullanım alanları

Yıllar	Fuel-oil Tüketim Miktarı (lt)	Fuel-oil Kullanım Alanları (m ²)
2019	28100	4750
2020	6300	1215
2021	28000	8380

Tablo 5. Taşıt cinsi ve taşıt sayıları

Taşıt Cinsi	2019 Yılına Ait Taşıt Sayısı	2020 Yılına Ait Taşıt Sayısı	2021 Yılına Ait Taşıt Sayısı
Otomobil	6	6	10
Otobüs	4	4	4
Kamyonet	1	1	2
Kepçe	1	1	1
Traktör	6	6	7
Römork	3	3	3
İş Makineleri	15	15	24
Diğer	5	6	7

Yerleşke içerisinde 150000 m²'lik yeşil alan bulunmaktadır. Yeşil alanların bakım çalışmalarında iş makineleri aktif olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden iş makineleri motorin ve benzin tüketimindeki en fazla payı üstlenmektedir. Ayrıca Osmaniye ilinde kış aylarındaki yağış yoğunluğundan dolayı elektrik kesintileri meydana gelmektedir. Hem bilgi işlem sistemlerinin hem de eğitimin aksamaması için jeneratörlerde aktif olarak kullanılmaktadır. **Tablo 6**'da motorin ve benzin tüketim miktarları verilmiştir.

Tablo 6. Motorin ve benzin tüketim miktarları

Yıllar	Motorin Tüketim Miktarı (lt)	Benzin Tüketim Miktarı (lt)
2019	30901	4976
2020	24100	2200
2021	10972	1114

Bu çalışma kapsamında OKÜ Karacaoğlan yerleşkesinin karbon ayak izi ISO 14064-1 standardı göz önüne alınarak IPCC standartlarına göre hesaplanmıştır. Fosil yakıt tüketimi ve iklimlendirme sistemlerinden kaynaklı karbon ayak izi kapsam 1'de, elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi kapsam 2'de değerlendirilmiştir. Hesaplamalar her bir sera gazı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplama formülleri aşağıda belirtilmiştir [10, 37].

$$CO_2 = \sum_{k=1}^n F_k * NCV_k * EF_k * (1 - BR)_k * YF_k \quad (1)$$

$$CH_4 = \sum_{k=1}^n F_k * NCV_k * EF_k * (1 - BR)_k * YF_k \quad (2)$$

$$N_2O = \sum_{k=1}^n F_k * NCV_k * EF_k * (1 - BR)_k * YF_k \quad (3)$$

$$CO_{2e} = (CO_2 + CH_4 + N_2O)_{\text{emisyonları}} \quad (4)$$

Burada, F_k; faaliyet verisini, NCV_k; net kalorifik değeri, EF_k; emisyon faktörünü, BR_k; biyokütle oranını, YF_k; yükseltgenme faktörünü tanımlamaktadır. Emisyon

faktörleri IPCC'nin yayınladığı Ulusal Sera Gazı Envanteri Yönergelerinden elde edilmiştir [38, 39].

3 Bulgular ve tartışma

OKÜ ilgili birimlerinden alınan tüketim verileri ve IPCC Ulusal Sera Gazı Envanteri Yönergelerinden elde edilen emisyon faktörleri ile hesaplamalar yapılmıştır. Her bir sera gazı (CO₂, CH₄, N₂O ve CO_{2e}) emisyon miktarları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Fosil yakıt kaynaklı emisyonlar kapsam 1'de değerlendirilirken elektrik tüketiminden kaynaklı emisyonlar kapsam 2 'de değerlendirilmiştir.

OKÜ Karacaoğlan yerleşkesinde doğalgaz tüketiminden kaynaklı toplam karbon emisyon miktarı 2019 yılında 319142.43 kg CO_{2e}, 2020 yılında 64254.43 kg CO_{2e}, 2021 yılında ise 150033.32 kg CO_{2e} olarak gerçekleşmiştir. **Tablo 7**'de doğalgaz tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları ayrı ayrı gösterilmiştir. 2020 ve 2021 yıllarının bazı dönemlerinde örgün eğitimden uzaktan eğitime geçiş olmuştur. Uzaktan eğitime geçişi ile havuz kullanımı ve yemekhane kullanımı kapanmıştır. Ortak alanlarda ve ısınma amaçlı doğalgaz kullanımı da önemli bir ölçüde azalmıştır.

Tablo 7. Doğalgaz tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları

Yıllar	CO ₂ Salmımı (kg)	CH ₄ Salmımı (kg)	N ₂ O Salmımı (kg)	CO _{2e} Salmımı (kg)
2019	318198.48	794.08	150.31	319142.43
2020	64064.30	159.88	30.26	64254.43
2021	149589.35	373.31	70.66	150033.32

OKÜ Karacaoğlan yerleşkesinde motorin tüketiminden kaynaklı toplam karbon emisyon miktarı 2019 yılında 84481.59 kg CO_{2e}, 2020 yılında 65614.64 kg CO_{2e}, 2021 yılında ise 29996.83 kg CO_{2e} olarak gerçekleşmiştir. **Tablo 8**'de motorin tüketiminden kaynaklı emisyon miktarları ayrı ayrı gösterilmiştir.

Tablo 8. Motorin tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları

Yıllar	CO ₂ Salmımı (kg)	CH ₄ Salmımı (kg)	N ₂ O Salmımı (kg)	CO _{2e} Salmımı (kg)
2019	83198.58	122.61	1160.40	84481.59
2020	64618.16	95.23	901.25	65614.64
2021	29541.27	43.53	412.02	29996.83

OKÜ Karacaoğlan yerleşkesinde benzin tüketiminden kaynaklı toplam karbon emisyon miktarı 2019 yılında 12320.87 kg CO_{2e}, 2020 yılında 5447.33 kg CO_{2e}, 2021 yılında ise 2758.33 kg CO_{2e} olarak gerçekleşmiştir. **Tablo 9**'da benzin tüketiminden kaynaklı emisyon miktarları ayrı ayrı gösterilmiştir. 2020 ve 2021 yıllarında uzaktan eğitime geçiş ile personellerde kısmi çalışmaya başlamıştır. Personel sayısının azalması ile hem ulaşım kaynaklı hem de bakım onarım, bahçe düzenlemesi gibi iş makinelerinin kullanım oranı azalmıştır. Üniversitede motorin ve benzin yakıtları daha çok iş makineleri tarafından tüketilmektedir. İş makinelerinin kullanım oranının azalması ile 2019 yılı ile

2021 yılları karşılaştırıldığı zaman hem motorin hem de benzin tüketiminde önemli bir azalma gerçekleşmiştir.

Tablo 9. Benzin tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları

Yıllar	CO ₂ Salınımı (kg)	CH ₄ Salınımı (kg)	N ₂ O Salınımı (kg)	CO _{2e} Salınımı (kg)
2019	11839.11	119.59	362.18	12320.87
2020	5234.33	52.87	160.13	5447.33
2021	2650.48	26.77	81.08	2758.33

OKÜ Karacaoğlan yerleşkesinde fuel-oil tüketiminden kaynaklı toplam karbon emisyon miktarı 2019 yılında 83474.20 kg CO_{2e}, 2020 yılında 18714.86 kg CO_{2e}, 2021 yılında ise 83177.14 kg CO_{2e} olarak gerçekleşmiştir. Tablo 10'da fuel-oil tüketiminden kaynaklı emisyon miktarları ayrı ayrı gösterilmiştir.

Tablo 10. Fuel-oil tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları

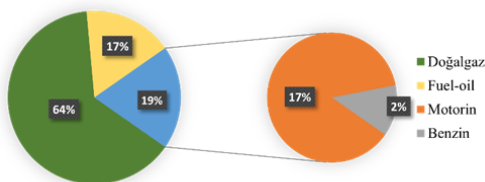
Yıllar	CO ₂ Salınımı (kg)	CH ₄ Salınımı (kg)	N ₂ O Salınımı (kg)	CO _{2e} Salınımı (kg)
2019	83474.20	90.59	171.48	83736.27
2020	18714.86	20.31	38.45	18773.61
2021	83177.14	90.27	170.87	83438.27

Kapsam-1 fosil yakıtlardan kaynaklı 2019 yılına ait karbon ayak izi 499.67 ton CO_{2e}, 2020 yılına ait karbon ayak izi 154.07 ton CO_{2e}, 2021 yılına ait karbon ayak izi 266.2 ton CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Tablo 11'de Kapsam-1 karbon ayak izi gösterilmiştir.

Tablo 11. Kapsam-1 karbon ayak izi

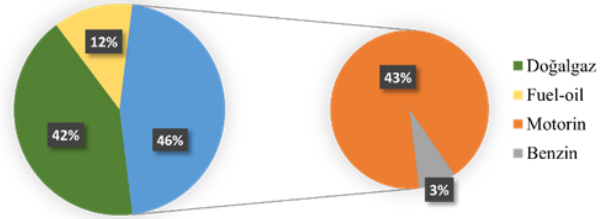
Yıllar	Kapsam-1			
	Doğalgaz Tüketiminden Kaynaklı CO _{2e} Salınımı (ton)	Motorin Tüketiminden Kaynaklı CO _{2e} Salınımı (ton)	Benzin Tüketiminden Kaynaklı CO _{2e} Salınımı (ton)	Fuel-oil Tüketiminden Kaynaklı CO _{2e} Salınımı (ton)
2019	319.14	84.48	12.32	83.73
2020	64.25	65.61	5.44	18.77
2021	150.03	29.99	2.75	83.43
Toplam	533.42	180.08	20.51	185.93

2019 yılı kapsam 1 emisyonları incelenirse, ısınma ve yakma amaçlı kullanılan fosil yakıtlar toplam emisyonların %81'ini oluştururken, ulaşımdan kaynaklı emisyonlar toplam emisyonların %19'unu oluşturmaktadır. Şekil 3'te 2019 yılına ait kapsam 1 emisyonlarından kaynaklı karbon ayak izinin dağılımları gösterilmiştir.



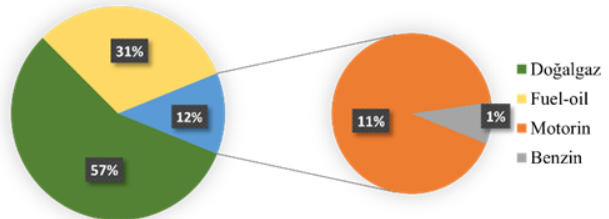
Şekil 3. 2019 yılı kapsam 1 emisyonlarının dağılımı

2020 yılı kapsam 1 emisyonlarında ısınma ve yakma amaçlı kullanılan fosil yakıtlar toplam emisyonların %54'ünü oluştururken, ulaşımdan kaynaklı emisyonlar %46'sını oluşturmaktadır. Şekil 4'te 2020 yılına ait kapsam 1 emisyonlarının karbon ayak izi dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 4. 2020 yılı kapsam 1 emisyonlarının dağılımı

2021 yılında ise kapsam 1 emisyonlarında ısınma ve yakma amaçlı kullanılan fosil yakıtlar toplam emisyonların %88'ini oluştururken, ulaşımdan kaynaklı emisyonlar %12'sini oluşturmaktadır. Şekil 5'te 2021 yılına ait kapsam 1 emisyonlarının karbon ayak izi dağılımları gösterilmiştir.

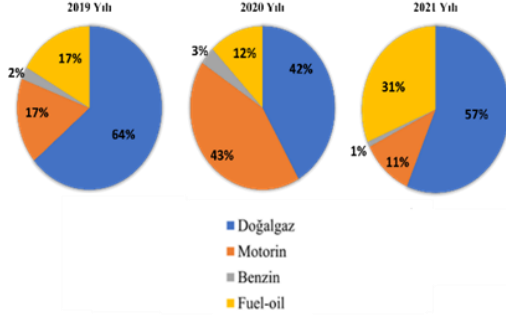


Şekil 5. 2021 yılı kapsam 1 emisyonlarının dağılımı

2019, 2020 ve 2021 yılları birlikte incelendiği zaman Karbon ayak izinin 2020 ve 2021 yıllarında azaldığı aşikardır. 2020 ve 2021 yıllarında karbon ayak izinin azalmasında COVID-19 tedbirleri kapsamında uzaktan eğitime geçişin rolü büyüktür. Isınma ve yakma yerleşke içerisinde öğrenci sayısının azalması ile birlikte ısınma için gerekli tüketimde azalmıştır. Bu yüzden özellikle doğalgaz ve fuel-oil tüketiminden kaynaklı karbon ayak izinin 2020 yılında yaklaşık %80 azaldığı tespit edilmiştir. Kapsam 1 fosil yakıtlardan kaynaklı karbon ayak izinin 2019 ve 2021 yıllarında en fazla doğalgaz tüketiminden kaynaklı iken 2020 yılında en fazla motorin tüketiminden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6'da 2019, 2020 ve 2021 yıllarında gerçekleşen emisyon oranları gösterilmiştir.

Kapsam-1 emisyonları fosil yakıt tüketiminden kaynaklı emisyonları içermektedir. Bu çalışmada elektrik tüketiminden kaynaklı emisyon kapsam-2'de değerlendirilmiştir. Elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi 2019 yılında 2456.03 ton CO_{2e}, 2020 yılında 1759.89 ton CO_{2e} ve 2021 yılında 2392.84 ton CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Tablo 12'de elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi miktarı

gösterilmiştir. Elektrik tüketiminden kaynaklı emisyon faktörü T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yayınladığı Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Bilgi Formundan elde edilmiştir [40].

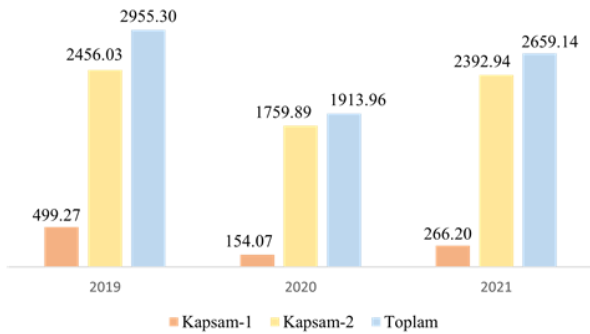


Şekil 6. 2019, 2020 ve 2021 yıllarında gerçekleşen emisyon oranları

Tablo 12. Elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi

Yıllar	Kapsam-2	
	Elektrik Tüketiminden Kaynaklı CO _{2e} Salınımı (ton)	Elektrik Kullanım Alanları (m ²)
2019	2456.03	209944
2020	1759.89	144464
2021	2392.94	172624

Osmaniye ilinin iklim şartlarından dolayı iklimlendirme sistemlerinin aktif olarak kullanılması, ortak alan ve çevre aydınlatmalarının gün boyu kullanımı elektrik tüketiminden kaynaklı karbon emisyonunun kapsam-1 emisyonlarına göre çok yüksek olmasına sebep olmaktadır. 2019 yılında kapsam-1 ve kapsam-2 emisyonları toplamı 2955.70 ton CO_{2e}, 2020 yılında 1913.96 ton CO_{2e} ve 2021 yılında 2659.14 ton CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Şekil 7’de kapsam 1 ve kapsam 2 emisyonları gösterilmiştir.



Şekil 7. Kapsam 1, kapsam 2 ve toplam karbon ayak izi

4 Sonuçlar

Tüm bireyler küresel ısınma ve iklim değişikliğinden olumsuz yönde etkilenmektedir. Buna rağmen sera gazlarının atmosfere salınmasında ağırlıklı olarak insan faaliyetleri neden olmaktadır. Dünyamız iklim değişikliğinin yol açtığı önemli etkenler ile karşı karşıya kalmaktadır [41].

Karbon emisyonlarının ölçümü ve bireysel sera gazı emisyonlarının miktarlarını azaltarak iklim değişikliğinin zararlı etkilerinden kaçınmak mümkündür [42]. Bu yüzden hava sıcaklığının artması, mevsim değişikliği ve yağışların azalması gibi olumsuz etkenlerden dolayı küresel ısınma konusunda hızlı bir şekilde önlemler almamız önem teşkil etmektedir. Küresel ısınma dengesinin sağlanabilmesi amacıyla sera gazı emisyon sınırlarının detaylı olarak belirlenmesi karbon emisyonlarının azaltmak için yapılması gereken en önemli çalışmalardan biridir. Günümüzde bir üniversite yerleşkesinin sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesi ve hesaplanması kapsamlı bir çalışma gerektirmektedir. Bu nedenle özellikle üniversitenin bakım ve işletme birimlerinin sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında kullanılacak tüm parametreler için doğru ve güncel bilgiye sahip olması gerekmektedir [43].

Bu çalışma da Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Karacaoğlan Yerleşkesinin fosil yakıtlar ve elektrik tüketiminden kaynaklı karbon ayak izi hesaplanmıştır. Üniversitenin karbon ayak izi ISO 14064-1 standardı göz önüne alınarak, IPCC Ulusal Sera Gazı Envanteri Yönergeleri ve Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Bilgi Formundan elde edilen emisyon faktörleri ile hesaplanmıştır. Kapsam-1 emisyonları 2019 yılında toplamda 499.67 ton CO_{2e}, 2020 yılında 154.07 ton CO_{2e}, 2021 yılında 266.20 ton CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. Kapsam-2 emisyonu ise 2019 yılında 2456.03 ton CO_{2e}, 2020 yılında 1759.89 ton CO_{2e}, 2021 yılında 2392.94 ton CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. 2019 yılında fosil yakıt tüketiminden kaynaklı emisyonlar toplam emisyonların %17’sini, 2020 yılında %8’ini, 2021 yılında ise %10’unu oluşturmaktadır. 2020 ve 2021 yıllarında örgün eğitimden uzaktan eğitime geçilmiş olsa bile kapsam-2 emisyonunda önemli bir düşüş olmamıştır. Bunun sebebi kampüs içerisinde iklimlendirme sistemlerinin aktif olarak kullanılması, çevre aydınlatması ve bilgi işlem sistemlerinin aktif olarak çalışmasından kaynaklanmaktadır. 2019 yılında elektrik tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları toplam emisyonların %83’ünü, 2020 yılında %91’ini ve 2021 yılında ise %89’unu oluşturmaktadır. Bu yüzden OKÜ’nün sera gazı emisyonları ile mücadelesinde öncelik olarak elektrik tüketimine karşı öncelik vermesi gerekmektedir. Bu kapsamda elektrik tüketiminin azaltılmasına yönelik hem personel hem de öğrenciler bilinçlendirilmelidir. Gereksiz enerji tüketiminden kaçınılmalıdır. Gerekli olan enerji ihtiyacına karşı üniversitenin güneş enerjisi sistemleri uygulamalarını kullanmaları gerekmektedir. Üniversite içerisinde iklimlendirme sistemlerinin aktif olarak kullanılmasından kaynaklı yenilenebilir enerji kaynakları ile kullanılabilen absorpsiyonlu soğutma sistemlerine öncelik verilmelidir. Ayrıca Üniversite içerisinde kullanılan split klimalar yerine merkezi VRF sistemlerinin sayılarının artırılması gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmayı gerçekleştirebilmek için gerekli verilerin temininde yardımlarını esirgemeyen OKÜ ilgili tüm birimlerine teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] S. Karyeyen, M. H. Aksoy, M. Özgören ve S. Koçak, Konya sanayisinde enerji verimliliği. Bölgesel Araştırma Raporları Serisi, 5, 2012.
- [2] S. Li, J.C. Faura, B. Talbi, M. Sadiq, K.S. Mohammed and M.F. Bashir, Dynamic correlated effects of electricity prices, biomass energy and technological innovation in Tunisia's energy transition. Utilities Policy, 82, 101521, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101521>
- [3] H. Dong and L. Zhang, Transition towards carbon neutrality: Forecasting Hong Kong's buildings carbon footprint by 2050 using a machine learning approach. Sustainable Production and Consumption, 35, 633-642, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.014>
- [4] A. Demir, Paris Anlaşması ve 26. Taraflar Konferansı (cop26)'nda Türkiye değerlendirmesi: yükümlülükler ve sorumluluklar. Biological Diversity and Conservation, 15(2), 162-170, 2022.
- [5] A. Kocaman, Sanayi şehri karabük ilindeki fosil yakıt kaynaklı karbon ayak izinin belirlenmesi ve orman varlıklarının emisyonu azaltmadaki etkisi. İzlek Akademik Dergi, 3(1), 44-55, 2020.
- [6] Türkiye İstatistik Kurumu, Sera gazı emisyon istatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862/>, Accessed 9 June 2023.
- [7] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Sera Gazı Envanter Raporu. <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-ulusal-sera-gazi-emisyon-envanteri/>, Accessed 9 June 2023.
- [8] J. Kiehle, M.S. Savolainen, M. Hilli and E. Pongracz, Carbon footprint at institutions of higher education: The case of the University of Oulu. Journal of Environmental Management, 329, 117056, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117056>
- [9] Y. Bıyık ve G. Civelekoğlu, Isparta ilinde karayolu kaynaklı karbon ayak izinin tespiti. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 4(2), 78-87, 2020.
- [10] Greenhouse Gas Protocol, <https://ghgprotocol.org/>, Accessed 20 June 2023.
- [11] N.C. Onat, Türkiye inşaat sektörünün global karbon ayak izinin analizi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(2), 529-545, 2018.
- [12] B. Ma, M.F. Bashir, X. Peng, W. Strielkowski and D. Kirikkaleli, Analyzing research trends of universities' carbon footprint: An integrated review. Gondwana Research, 121, 259-275, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.05.008>
- [13] P.S. Figueiro and E. Raufflet, Sustainability in higher education: a systematic review with focus on management education. Journal of Cleaner Production, 106, 22-33, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.118>
- [14] F. Findler, N. Schönherr, R. Lozano and B. Stacherl, assessing the impacts of higher education institutions on sustainable development—an analysis of tools and indicators. Sustainability, 11(1), 59, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11010059>
- [15] V. Filimonau, D. Archer, L. Bellamy, N. Smith and R. Wintrip, The carbon footprint of a UK University during the COVID-19 lockdown. Science of the Total Environment, 756, 143964, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143964>
- [16] O.J. Robinson, A. Tewkesbury, S. Kemp and L. D. Williams, Towards a universal carbon footprint standard: A case study of carbon management at universities. Journal of Cleaner Production, 172, 4435-4455, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.147>
- [17] S. Ozer and B. Dogan, Thermodynamic analyzes in a compression ignition engine using fuel oil diesel fuel blends. Thermal Science, 26, 3079-3088, 2022
- [18] B. Gökçek, A. Bozdağ ve H. Demirbağ, Niğde ömer halisdemir üniversitesi örneğinde karbon ayak izinin belirlenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 721-730, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.514438>
- [19] R. Clabeaux, M. Carbajales, D. Ladner and T. Walker, Assessing the carbon footprint of a university campus using a life cycle assessment approach. Journal of Cleaner Production, 273, 122600, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122600>
- [20] J. Fouladvand, R. Oudendijk, M. Hooimeijer, R. Dersk and S. Berndsen, Carbon footprint of a news broadcasting organization. Sustainable Production and Consumption, 39, 257-268, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.004>
- [21] J. Cooper, M. Bird, S. Acha, P. Amrit, B. Chachuat, N. Shah and O. Matar, The carbon footprint of a uk chemical engineering department – The case of Imperial College London. Procedia CIRP, 116, 444-449, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.075>
- [22] S. Syafrudin, B. Zaman, M. A. Budihardjo, S. Yumaroh, D. I. Gita and D. S. Lantip, Carbon footprint of academic activities: A case study in Diponegoro University. Earth and Environmental Science, 448, 012008, 2020. <https://doi:10.1088/1755-1315/448/1/012008>
- [23] O. O. Ologun and S. T. Wara, Carbon footprint evaluation and reduction as a climate change mitigation tool - case study of Federal University of Agriculture Abeokuta Nigeria. International Journal of Renewable Energy Research, 4, 176-181, 2014.
- [24] P. Yanez, A. Sinha and M. Vasquez, Carbon footprint estimation in a university campus: evaluation and insights. Sustainability, 12, 181, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12010181>
- [25] T. Utaraskul, Carbon footprint of environmental science students in Suan Sunandha Rajabhat University Thailand. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 197, 1156-1160, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.371>

- [26] A. Kurnuç Seyhan ve M. Çerçi, IPCC tier 1 ve defra metotları ile karbon ayak izinin belirlenmesi: Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi'nin yakıt ve elektrik tüketimi örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26(3), 386-397, 2022. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1061021>
- [27] G. N. Güğül ve N. Kılınç, Uzaktan eğitim ile örgün eğitimin karbon ayak izine etkilerinin karşılaştırılması. Canakkale 18 Mart University Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences, 8, 124-131, 2022. <https://doi.org/10.28979/jarnas.944816>
- [28] İ.F. Yaka, A. Koçer ve A. Güngör, Akdeniz Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu karbon ayak izinin tespiti. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12(3), 37-45, 2015.
- [29] G. Binboğa ve A. Ünal, Sürdürülebilirlik ekseninde Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nin karbon ayak izinin hesaplanmasına yönelik bir araştırma. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, 21, 187-202, 2018. <https://doi.org/10.18092/ulikidince.323532>
- [30] K. Kumaş, A. Akyüz ve A. Güngör, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bucak Yerleşkesi yükseköğretim birimlerinin karbon ayak izi tespiti. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 1277-1291, 2019.
- [31] M. B. Kızıılmaz, A. Keçebaş ve M. Ertürk, Sanayi Enerji Yönetimi Sistemi için bir gıda tesisinin enerji verimliliğinin incelenmesi. International Journal of Pure and Applied Sciences, 7(1), 51-62, 2021.
- [32] H. Akhan, Sanayide enerji yönetimi: pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar. Trakya University Journal of Engineering Sciences, 23(1), 11-23, 2022.
- [33] Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, 2019 yılı idari faaliyet raporu. [2019 yılı idare faaliyet raporu \(osmaniye.edu.tr/\)](https://www.osmaniye.edu.tr/), Accessed 15 June 2023.
- [34] Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi. <https://www.osmaniye.edu.tr/anasayfa/>, 15 June 2023.
- [35] Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, 2020 yılı idari faaliyet raporu. [2020 yılı idare faaliyet raporu \(osmaniye.edu.tr/\)](https://www.osmaniye.edu.tr/), Accessed 15 June 2023.
- [36] Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, 2021 yılı idari faaliyet raporu. [2021 yılı idare faaliyet raporu \(osmaniye.edu.tr/\)](https://www.osmaniye.edu.tr/), Accessed 15 June 2023.
- [37] IPCC, Task force on National Greenhouse Gas inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, Accessed 20 June 2023.
- [38] IPCC, Guidelines for national greenhouse gas inventories, general guidance and reporting. [Publications - IPCC-TFI \(iges.or.jp\)](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/), Accessed 20 June 2023.
- [39] IPCC, Guidelines for national greenhouse gas inventories, energy. [Publications - IPCC-TFI \(iges.or.jp\)](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/), Accessed 22 June 2023.
- [40] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye ulusal elektrik şebekesi emisyon faktörü bilgi formu. <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru/>, Accessed 22 June 2023.
- [41] R. Sreng and M. G. Yiğit, Carbon footprint studies on Esentepe Campus of Sakarya University. Sakarya University Journal of Science, 21, 1095-1099, 2017.
- [42] T. Boguski, Life cycle carbon footprint of the National Geographic magazine. International Journal of Life Cycle Assessment, 15, 635-643, 2010.
- [43] Y. A. Adenle and H. M. Alshuwaikhat, Spatial estimation and visualization of co2 emissions for campus sustainability: the case of King Abdullah University of Science and Technology. Sustainability, 9(11), 2124, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9112124>





Helisel sarılmış ısı eşanjörünün deneysel ve sayısal analizi Experimental and numerical analysis of helical coiled heat exchanger

Mustafa Caner^{1,*} , Ertan Buyruk² 

^{1,2} Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, helisel ısı eşanjörlerinin ısı transferi karakteristikleri sürekli şartlarda araştırılmıştır. Deneylerde soğuk suyun eşanjöre giriş sıcaklığı 20 °C, sıcak su sıcaklığı ise 50 °C olarak belirlenmiştir. Soğuk suyun debisi 2 – 3 – 4 ve 5 L/dk olarak ayarlanmıştır. Soğuk suyun eşanjörden çıkış sıcaklığı ölçülmüş ve iç taraf Nu sayısı hesaplanmıştır. Sayısal çalışma için eşanjörün üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı (Fluent 18.2) kullanılarak eşanjördeki ısı özelliklerinin ve hız konturlarının belirlenmesi için sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. İç taraf Nu sayısı ve soğuk suyun eşanjörden çıkış sıcaklığı deneysel çalışmada elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarının deneysel bulgularla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Helisel ısı eşanjörü, Nu sayısı, Isı transferi, HAD

1 Giriş

Farklı sıcaklıklara sahip ve katı bir sınır tarafından ayrılmış iki akışkan arasındaki ısı transferi, pek çok mühendislik uygulamasında gerçekleştirilmektedir. Isı transferi sürecini gerçekleştirmek için ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Çeşitli uygulamalar için çeşitli türde ısı değiştiriciler geliştirilmiştir. Bu uygulamalar arasında buhar enerji santralleri, kimyasal işleme tesisleri, bina ısıtma ve iklimlendirme sistemleri ile soğutma üniteleri yer almaktadır. Helisel ısı eşanjörleri, mühendislik alanlarında kullanılan bir ısı değiştirici tipidir ve enerji santralleri, nükleer reaktörler, soğutma ve iklimlendirme sistemleri, ısı geri kazanım sistemleri, kimyasal işleme ve gıda endüstrileri gibi alanlarda tercih edilmektedir [1-3]. Bu eşanjörler, yüksek ısı transfer performansları, basit yapıları ve ekonomik üretim maliyetleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır [4-7].

Literatürde, helisel ısı eşanjörlerinde ısı transferinin düz borulardakine kıyasla daha yüksek olduğu yaygın olarak raporlanmıştır. Merkezkaç kuvveti etkisiyle meydana gelen ikincil akış, helisel sarılmış borulardaki ısı transferini artırmak için önemli bir yeteneğe sahiptir [8-9]. Son yıllarda helisel sarılmış borularda eğrilik etkisi ve merkezkaç kuvveti tarafından üretilen ikincil akış hareketinin etkilerini araştırmak için bir dizi teorik ve sayısal çalışma sunulmuştur.

Abstract

In this study, heat transfer characteristics of helical heat exchangers were investigated under steady state conditions. In the experiments, the inlet temperature of the cold water into the heat exchanger was set as 20 °C and the hot water temperature was set as 50 °C. The flow rates of cold water were set as 2 - 3 - 4 and 5 l/min. The outlet temperature of the cold water from the heat exchanger was measured and the inside Nu number was calculated. For numerical study a three dimensional model of the heat exchanger was designed. Numerical analysis was carried out to determine the thermal properties and velocity contours in the heat exchanger using a computational fluid dynamics software program package (Fluent 18.2). The inside Nu number and the outlet temperature of the water from the heat exchanger were compared with the data recorded in the experimental study. The computational fluid dynamics results were obtained to be in agreement with the experimental results.

Keywords: Helical coiled heat exchanger, Nu number, Heat transfer, CFD

Neshat vd. [10] Helisel sarılmış ısı değiştiricilerin dış yüzeyinde meydana gelen doğal konveksiyonu incelemek için deneysel ve sayısal araştırma yapmıştır. Deneysel çalışmada iki farklı eğrilik oranına sahip toplam dört helisel ısı değiştirici kullanılmıştır. Her bir ısı değiştirici, tanka hem yatay hem de dikey olarak yerleştirilmiştir. Sayısal çalışmada ise üç farklı boru çapı, üç farklı sarmal çapı, üç farklı hatve ve iki tur sayısı değişken parametre olmak üzere oluşturulan 54 ısı değiştirici incelenmiştir. Sonuçlar L / d (toplam boru uzunluğu / boru çapı) > 90.546 olduğu durumda dikey yerleştirilmiş ısı değiştiricinin yataya göre daha yararlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca ısı değiştirici uzunluğunun artması ile Nusselt sayısı da artmıştır. Amori [11] gerçekleştirdiği deneysel çalışmada soğuk suya batırılmış helisel borulardan oluşan ısı değiştiricilerin ısı ve hidrolik özelliklerini incelemiştir. İnceleme kapsamında, dikey tek borulu helisel ısı değiştirici ve paralel bağlantılı üç dikey helisel sarmaldan oluşan iki farklı ısı değiştirici tipi test edilmiştir. Üçlü ısı değiştirici, tek borulu helisel yapıya kıyasla belirgin bir şekilde daha yüksek ısı transfer performansı sergilemiştir. Bu sonuçlar, daha küçük boyutlu ısı değiştiricilerinin kullanılabilir potansiyelini göstermiştir. Aynı zamanda, üçlü ısı değiştiricideki basınç düşüşü, tek borulu yapıya göre oldukça düşük seviyede gerçekleşmiştir. Pawar ve Sunnapwar [12] sürekli koşullarda

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mustafacaner@cumhuriyet.edu.tr (M. Caner)
Geliş / Received: 20.07.2023 Kabul / Accepted: 23.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1330247

konveksiyon yoluyla ısı transferini deneysel olarak araştırmak amacıyla suya yerleştirilmiş helisel ısı değiştiricileri kullanmıştır. Araştırma kapsamında, farklı geometrik özelliklere sahip üç adet ısı değiştirici kullanılmıştır. Deneyler sırasında, tank içerisindeki su 60 °C sabit sıcaklıkta tutulmuş ve helisel borular içinden soğuk su akışı sağlanmıştır. Toplamda 10 farklı soğuk su debisi için 3 farklı ısı değiştiricisinde 30 ayrı test gerçekleştirilmiştir. Jayakumar vd. [13] tarafından dikey yerleştirilmiş helisel ısı değiştiriciler için sarmal çapı, hatve ve boru çapı gibi değişen parametreler için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiş ve bunların ısı transferi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu parametrelerin etkisi belirlendikten sonra, Nusselt sayısının tahmini için korelasyonlar geliştirilmiştir. Diğer bir uygulamada ise [14] sabit ısı akışı uygulanan helisel sarılmış ısı eşanjörlerinin dış yüzeylerinden meydana gelen zorlanmış konveksiyon deneysel olarak incelenmiştir. 7.086 ile 16.142 arasında değişen D / d_o (sargı çapının borunun dış çapına oranı) ve 1.81 ile 3.205 arasında değişen P / d_o (hatvenin borunun dış çapına oranı) oranlarına sahip ısı eşanjörleri kullanılmıştır. Sonuçlar, bu parametrelerin (D / d_o ve P / d_o) ortalama ısı transfer katsayısı üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Zheng vd. [3] çukurlu helisel sarılmış mini borularda meydana gelen ısı transferi ve akış yapısı sayısal olarak incelemiştir. Boru çapının sarmal çapına oranının, çukur yoğunluğunun ve çukur boyutunun etkileri incelenmiştir. Çukurlu durumun, pürüzsüz durumdan daha yüksek bir Nusselt sayısına sahip olduğu elde edilmiştir. Ayrıca, çukurlar nedeniyle duvar sıcaklığı değerinde büyük bir azalma görülmüştür. Zhang vd. [15] küresel oluklu helisel sarılmış borudaki ısı transferi ve basınç düşüşünü üç boyutlu bir sayısal simülasyon ile incelemiştir. Helisel sarılmış ısı eşanjörlerinde küresel oluklu çeşitli geometrik parametreler, ısı transferini arttırmak için incelenmiştir. Helisel sarılmış oluklu borunun toplam ısı transfer performansının, aynı koşulda pürüzsüz sarmal borununkinden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Prabhanjan vd. [16] helisel sarılmış boruların suya yerleştirildiği durumda doğal konveksiyonla gerçekleşen ısı transferini deneysel olarak araştırmışlardır. Dış Nu sayısı farklı karakteristik uzunluklar kullanılarak Ra sayısı ile ilişkilendirilmiştir. Geliştirilen modeller, helisel sarılmış bir ısı değiştiriciden geçen akışkanın giriş sıcaklığı, tankdaki suyun sıcaklığı, eşanjör boyutları ve akışkanın debisi gibi belirtilen koşullar altında çıkış sıcaklığını tahmin etmek amacıyla bir tahmin modeli geliştirmek için kullanılmıştır. Fernández-Seara vd. [17] bir sıvı depolama tankı içine yerleştirilmiş helisel sarılmış bir ısı eşanjöründe ısı transferi ve basınç düşüşünü tahmin etmek için sayısal bir model geliştirmiştir. Kurulan sistemde iç ve dış akışkan olarak su kullanılmıştır. Isı eşanjörünün dış yüzeyi için sınır koşulu olarak doğal konveksiyon seçilmiştir. Geliştirilen model, temsili geometrik parametrenin toplam ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır.

Literatür incelendiğinde helisel sarılmış ısı eşanjörlerinde ısı transferini inceleyen ve yabancı dilde yayınlanmış çalışmalar olduğu görülmektedir, ancak

konuyla ilgili Türkçe çalışmaların sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın önemli bir boşluğu doldurarak ulusal literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, helisel sarılmış ısı değiştiricilerinde ısı transferinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda öncelikle deney düzeneği tasarlanıp kurulmuştur. Elde edilen deneysel bulgular, önceden gerçekleştirilmiş çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Helisel ısı değiştiricilerde ısı özellikleri karakterize etmek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi gerçekleştirilmiştir. HAD sonuçları deneysel bulgular ile karşılaştırılmış ve grafikler halinde sunulmuştur.

2 Deneysel yöntem

Helisel sarılmış ısı eşanjörlerinde ısı transferini araştırmak amacıyla deney sistemi kurulmuştur. Tablo 1'de çalışmada kullanılan helisel borulu ısı eşanjörünün boyutları görülmektedir.

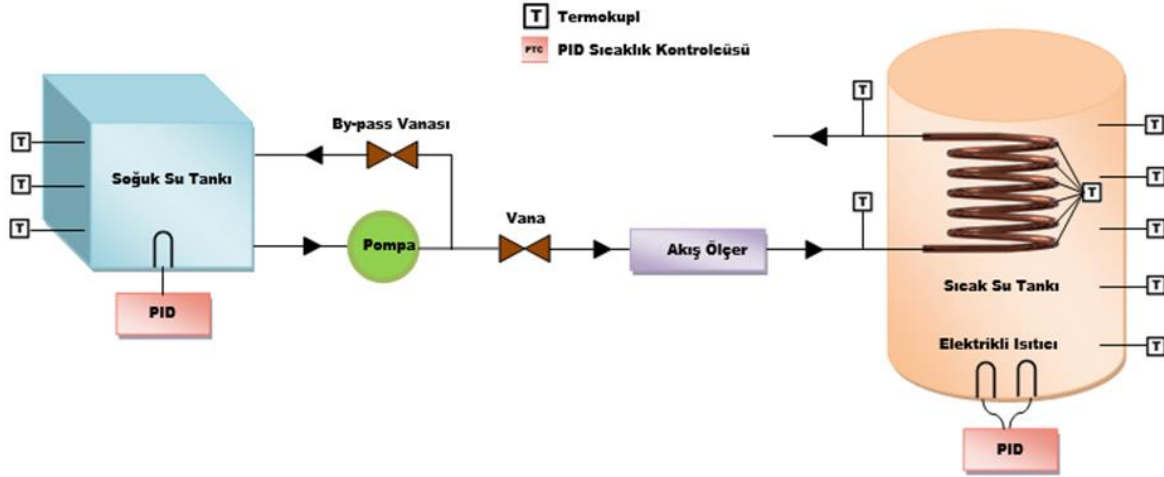
Tablo 1. Çalışmada kullanılan eşanjörün boyutları

Parametre	Değer (mm)
Borunun dış çapı	16
Borunun iç çapı	14
Et kalınlığı	1
Hatve	25
Sarım çapı	170

Sıcak su 35 cm çapında 80 cm yüksekliğinde bir tankta depolanmıştır. Helisel borulara gönderilecek soğuk suyu depolamak için ise 45 x 45 x 50 cm boyutlarında tank kullanılmıştır. Her iki tankta 2 mm kalınlığında galvanizli çelikten üretilmiştir. Isı kaybını azaltmak için tanklar 10 cm kalınlığında cam yünü ile yalıtılmıştır.

Deneylerin sürekli şartlarda gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu nedenle tankta bulunan su sıcaklıklarının zamanla değişmemesi gerekmektedir. Sıcak su tankındaki suyu belirlenen deney sıcaklığına ısıtmak ve deneyler sırasında sıcaklığını sabit tutmak için tankın alt kısmına toplam gücü 7.5 kW olan iki adet elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Isıtıcıların kontrolü daha önce farklı bir çalışmada [18] kullanılan ve detayları verilen PID sıcaklık kontrolcüsü ile sağlanmıştır. Böylece tanktaki suyun sıcaklığı test sıcaklığında sabit tutulmuştur. Soğuk su tankındaki suyun sıcaklığını test sıcaklığına ısıtmak için tankın içine 3.75 kW gücünde elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bu tanktaki suyun sıcaklığını ayarlamak için benzer şekilde PID sıcaklık kontrolcüsü kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 1'de görülmektedir.

Soğuk suyun ısı eşanjörüne giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçebilmek için daldırma tip termokupllar kullanılmıştır. Eşanjörün duvar sıcaklığını ölçebilmek için borunun dış yüzeyine yüzey tip termokupllar yerleştirilmiştir. Bu termokuplların sıcak sudan etkilenmesini engellemek amacıyla termokuplların üzeri yalıtılmıştır. Sıcak su tankındaki sıcaklık dağılımını belirleyebilmek için tanka 15'er cm aralıklarla beş adet termokupl yerleştirilmiştir. Soğuk su tankına ise 10'ar cm aralıklarla üç adet termokupl yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Isı eşanjöründe suyun dolaşımı frekans konvertörlü bir sirkülasyon pompası ile sağlanmıştır. Eşanjöre giren suyun debisi vana yardımıyla ayarlanmış ve akış ölçer ile ölçülmüştür.

Deney parametreleri Tablo 2’de özetlenmiştir. Veri toplama işlemi için sistemin rejime gelmesi beklenmiştir. Sürekli koşullar gerçekleştikten sonra veriler 15 s aralıklarla kayıt edilmiştir. Hesaplamalarda kayıt edilen son 12 verinin ortalaması kullanılmıştır. Deneysel sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için tüm deneyler ikinci kez tekrarlanmıştır.

Tablo 2. Deney parametreleri

Deney Parametresi	Değer
Sıcak su sıcaklığı (°C)	50
Soğuk su sıcaklığı (°C)	20
Soğuk su debisi (L/dk)	2 – 3 – 4 – 5

Boru içinden akan suyun termofiziksel özellikleri (ρ , c_p , μ , k) sabit kabul edilmiştir ve akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalamasında alınmıştır. Soğuk suya ısı geçişi Denklem (1) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\dot{Q} = \rho \dot{V} c_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

Bu denklemde T_o soğuk suyun borudan çıkış sıcaklığını, T_i ise soğuk suyun boruya giriş sıcaklığını ifade etmektedir. İç taraftaki ısı taşınım katsayısı Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$h_i = \frac{\dot{Q}}{A_i \Delta T_i} \quad (2)$$

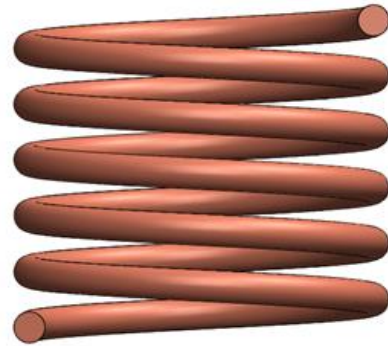
ΔT_i akışkanın ortalama sıcaklığı ile borunun iç yüzeyinin ortalama sıcaklığı arasındaki farkı ifade etmektedir. İç yüzey sıcaklığı sürekli şartlarda enerji dengesinden hesaplanmıştır.

İç tarafta Nu sayısı ise Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k} \quad (3)$$

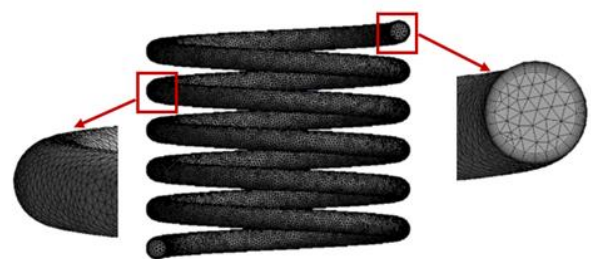
3 Sayısal analiz

Helisel sarılmış ısı eşanjörlerinde hız konturlarını ve sıcaklık dağılımlarını incelemek amacıyla sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler için deneysel çalışmada kullanılan ısı eşanjörü üç boyutlu olarak modellenmiştir. Şekil 2’de ısı eşanjörünün üç boyutlu modeli görülmektedir.



Şekil 2. Helisel sarılmış ısı eşanjörü modeli

Sayısal analizler hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programı (ANSYS Fluent 18.2) [19] kullanılarak farklı Re sayıları için gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan ağ yapısı 460594 düğüm noktası ve 1087605 hücreden meydana gelmektedir. Analizlerde kullanılan ağın yapısı Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. Helisel sarılmış ısı eşanjörü modeli

Deneylerde kullanılan bakır borunun et kalınlığı 1 mm'dir. Et kalınlığı düşük olduğu için sayısal çalışmada duvarda ağ oluşturulmasına gerek duyulmayan cidar iletim (shell conduction) modeli kullanılmıştır. Böylece ağ sayısı ve hesaplama süresi azaltılarak; sıcak sudaki doğal taşınım, boru duvarından iletim ve boru içinde zorlanmış taşınım modellenmiştir.

Akışkanın boruya giriş hızları, boruya giriş sıcaklığı, deneysel olarak elde edilen sıcak su sıcaklıkları ve dış taraftaki ısı taşınım katsayıları sınır koşulları olarak tanımlanmıştır. 4 L/dk debisinde kullanılan sınır koşulları örnek olarak Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 4 L/dk debisinde kullanılan sınır koşulları

Sınır Koşulu	Değer
Giriş hızı (m/s)	0.4331
Soğuk suyun eşanjöre giriş sıcaklığı (°C)	20
Ort. Sıcak su sıcaklığı (°C)	50.5
Dış taraftaki ısı transfer katsayısı (W/m ² K)	1023

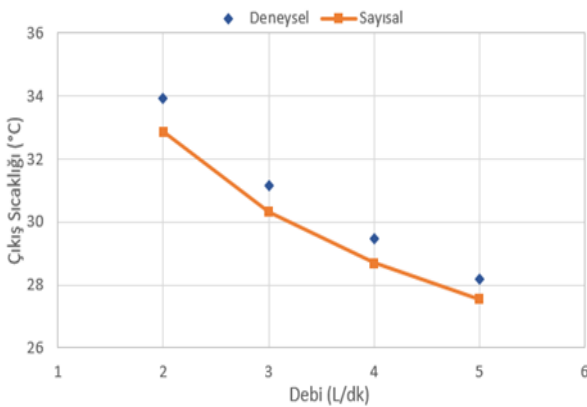
Süreklilik ve momentum denklemlerinde basınç ve hız alanlarını ilişkilendirmek üzere SIMPLE algoritması ve taşınım terimlerini ele almak için ikinci dereceden upwind şeması kullanılmıştır. Yakınsama kriteri, süreklilik ve x, y ve hız bileşenleri için 10⁻⁵, enerji denklemi için ise 10⁻⁶ olarak belirlenmiştir. Ayrıca ikincil akış nedeniyle meydana gelen karmaşık akış yapısını daha iyi çözümlmek adına k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

4 Bulgular

Deneysel çalışma sonucunda akışkanın eşanjörden çıkış sıcaklığı ölçülmüştür. Ayrıca kayıt edilen veriler kullanarak iç tarafta Nu sayısı hesaplanmıştır. Sayısal analiz sonucunda ise akışkanın çıkış sıcaklığı, hız konturları ve sıcaklıklar konturları elde edilmiştir.

4.1 Çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması

Deneyler sırasında soğuk suyun eşanjör çıkışındaki sıcaklığı daldırma tip termokupl ile ölçülmüştür. HAD analizinde ise çıkış kesitinde alan ağırlıklı ortalama sıcaklık değeri belirlenmiştir. Elde edilen deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarına göre debinin artması ile çıkış sıcaklığı azaltmıştır. Deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırılması Şekil 4'te sunulmuştur.

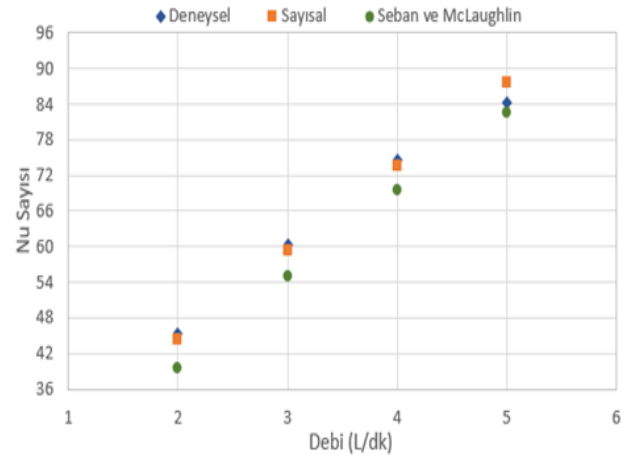


Şekil 4. Deneysel ve sayısal çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması

Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki en yüksek fark %3.23 olarak hesaplanmıştır. Sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir.

4.2 Nu sayısının karşılaştırılması

Deneysel çalışma sırasında ölçülen veriler kullanılarak farklı debiler için iç Nu sayıları hesaplanmıştır. Sayısal çalışmaya ait Nu sayılarını hesaplamak için gerekli veriler HAD analizi sonuçlarından alınmıştır. Şekil 5'te deneysel olarak, sayısal olarak ve literatürden yararlanılarak [20] hesaplanan Nu sayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekil incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Debi arttıkça beklenildiği gibi Nu sayısı da artmıştır.



Şekil 5. Nu sayılarının karşılaştırılması

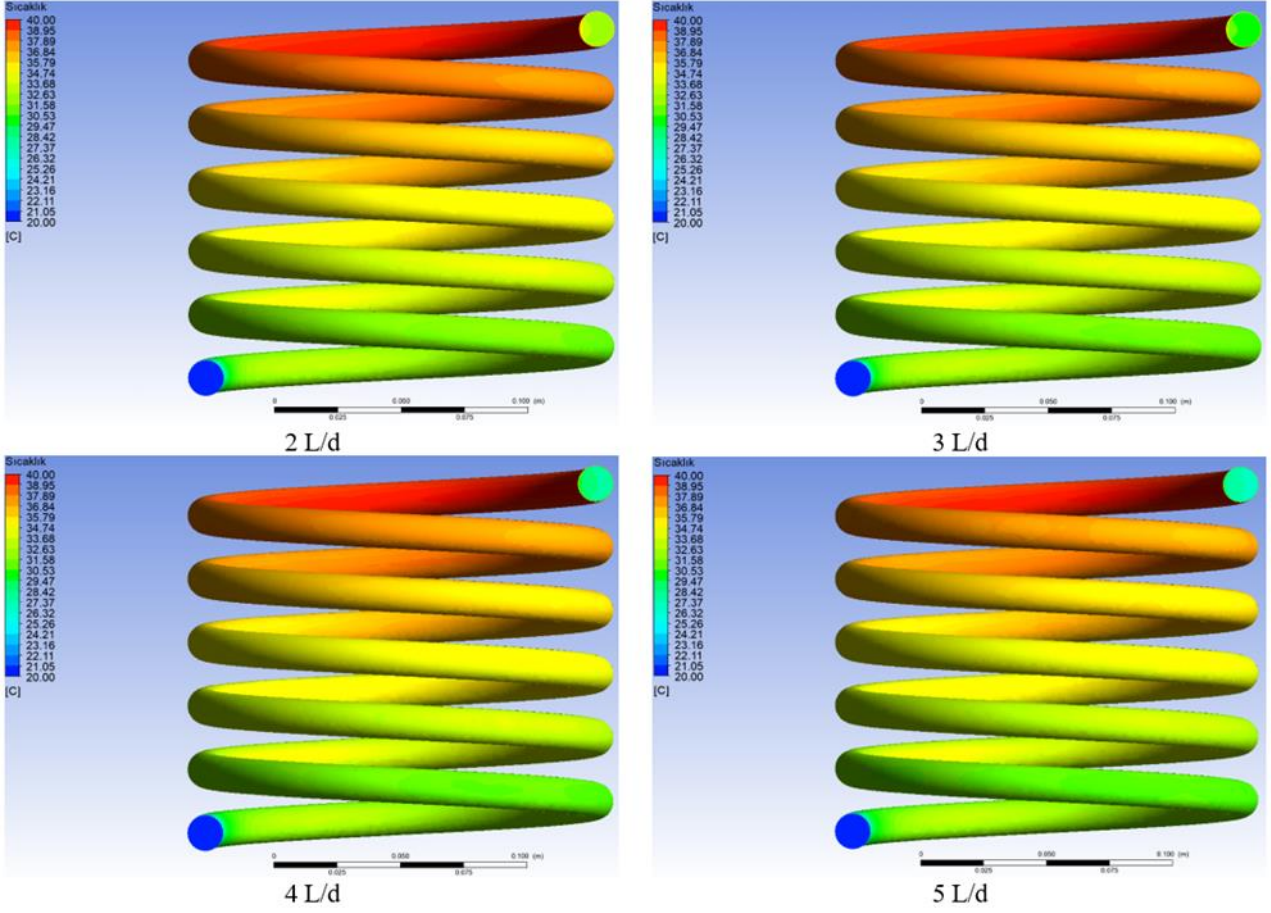
4.3 Sayısal analiz sonuçları

Şekil 6'da farklı debilerde boru duvarındaki sıcaklık dağılımları verilmiştir. Isı değiştirici girişinde suyun sıcaklığı 20 °C olarak belirlenmiştir. Isı değiştiricinin çevresindeki suyun sıcaklığı ise 50 ±0.5 °C'dir. Sıcak sudan soğuk suya ısı transferi sonucunda boru içindeki su boru boyunca ısınır ve boru duvar sıcaklığı artar.

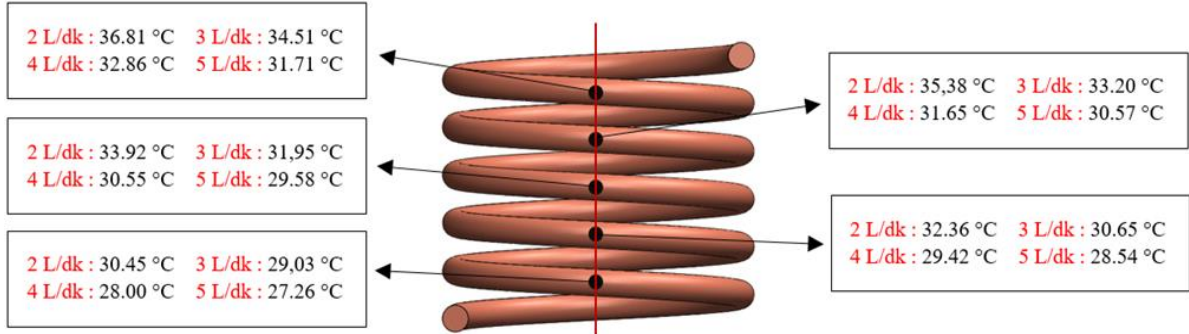
Sıcaklık değerleri birbirine yakın olduğu için sayısal değerlerdeki farklılıklar Şekil 6'da net olarak görülememektedir. Farklılıkları net olarak ortaya koyabilmek adına eşanjör yüzeyinde bir doğru çizilerek her bir turda bu doğru üzerinde yer alan noktaların koordinatları belirlenmiştir. Farklı debilerde bu koordinatlara ait sıcaklık değerleri Fluent'ten alınmıştır. Şekil 7'de eşanjör yüzeyinde belirlenen noktalar ve farklı debilerde bu noktalara ait sıcaklık değerleri görülmektedir. Beklenildiği gibi debi arttıkça belirlenen noktaların sıcaklık değerleri azalmıştır.

Şekil 8'de 2 L/dk debisinde elde edilen sıcaklık konturları verilmiştir. Sıcaklık konturları incelendiğinde helisin iç kısmında sıcaklığın daha yüksek dış kısmında ise daha düşük olduğu görülmektedir. Girişte suyun sıcaklığı 20 °C iken her bir turda suyun sıcaklığı artmış ve en yüksek su sıcaklığı 38.63 °C olarak elde edilmiştir.

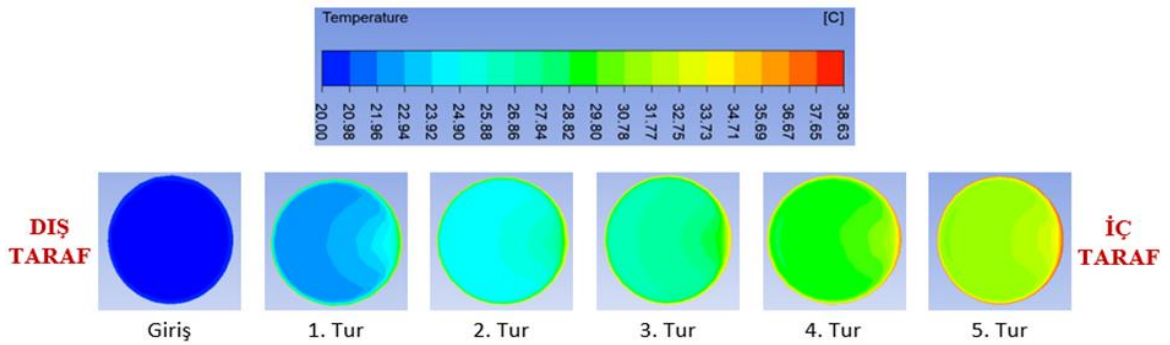
Şekil 9'da farklı debiler için eşanjörün son turunda elde edilen hız konturları görülmektedir. Hız konturlarına göre helisin dış tarafında akışkan hızı iç tarafa göre daha yüksektir.



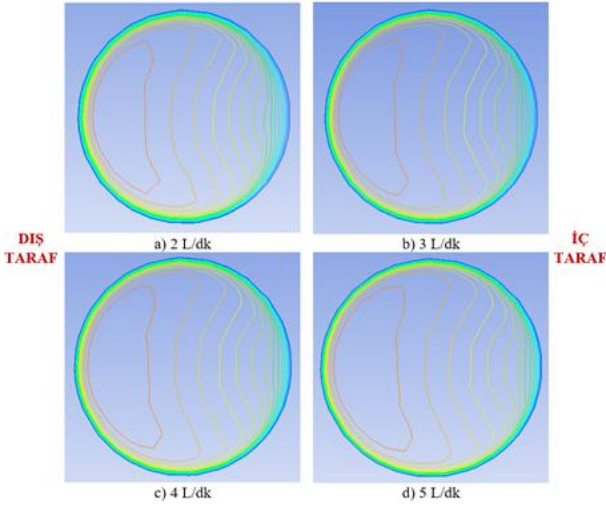
Şekil 6. Farklı debilerde yüzey sıcaklıkları



Şekil 7. Belirlenen noktaların sıcaklık değerlerinin farklı debilerde karşılaştırılması

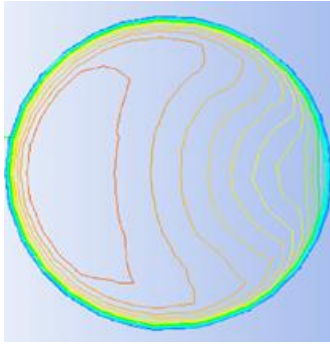


Şekil 8. 2 L/dk debisinde sıcaklık konturları



Şekil 9. Farklı debilerde son turdaki hız konturları

Pawar ve Sunnapwar [21] tarafından helisel eşanjörlerde elde edilen hız konturu Şekil 10'da sunulmuştur. Şekil 9 ve Şekil 10 birlikte incelendiğinde sonuçların görsel olarak uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Önceki çalışmada elde edilen hız konturu

5 Sonuçlar

Helisel sarılmış ısı eşanjörlerinde ısı transferi özelliklerinin elde edilebilmesi amacıyla deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Öncelikle deneysel, sayısal ve literatürden yararlanılarak hesaplanan iç taraf Nu sayıları karşılaştırılmıştır. Daha sonra suyun eşanjörden çıkış sıcaklıklarının deneysel ve sayısal değerleri incelenmiştir. Sonuçların uyumlu olduğu görüldükten sonra HAD analiz çıktıları olarak sıcaklık konturları ve hız konturları incelenmiştir. Bu çalışmadan helisel ısı eşanjörleri ile ilgili olarak elde edilen bazı sonuçlar aşağıda vurgulanmıştır:

1. Eşanjörde dolaşan suyun debisinin artırılması beklenildiği gibi Nu sayısını artırmıştır.
2. Eşanjörde dolaşan suyun debisinin artmasıyla birlikte suyun eşanjörden çıkış sıcaklığı düşmüştür.
3. Suyun eşanjörden çıkış sıcaklıkları için deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki fark en fazla %3.23 olarak hesaplanmıştır. Bu değer sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.
4. Suyun hızı helisin dış tarafında iç tarafa göre daha fazladır. Dış tarafta meydana gelen yüksek hızlı akış

nedeniyle ısı transferinin daha yüksek olduğu yorumu yapılabilir

5. Sıcaklık konturları incelendiğinde sıcaklığın helisin iç kısmında daha yüksek olduğu görülmektedir.

Simgeler

\dot{Q}	Isı transferi [kW]
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
\dot{V}	Hacimsel debi [m^3/s]
c_p	Özgül ısı [kJ/kgK]
T	Sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$]
h	Isı taşınım katsayısı [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Nu	Nusselt sayısı
A	Alan [m^2]
d	Boru çapı [m]
k	Isı iletim katsayısı [W/mK]

Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından M-2022-828 proje numarası ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] M. E. Ali, Laminar natural convection from constant heat flux helical coiled tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 41 (14), 2175–2182, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00322-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00322-0).
- [2] S. Vashisth, V. Kumar and K. D. P. Nigam, A Review on the Potential Applications of Curved Geometries in Process Industry. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47 (10), 3291–3337, 2008. <https://doi.org/10.1021/ie701760h>.
- [3] L. Zheng, Y. Xie and D. Zhang, Numerical investigation on heat transfer and flow characteristics in helically coiled mini-tubes equipped with dimples. International Journal of Heat and Mass Transfer, 126, 544–570, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.111>.
- [4] R. C. Xin, A. Awwad, Z. F. Dong, M. A. Ebadian and H. M. Soliman, An investigation and comparative study of the pressure drop in air-water two-phase flow in vertical helicoidal pipes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 39 (4), 735–743, 1996. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00164-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00164-6).
- [5] M. Kahani, S. Z. Heris and S. M. Mousavi, Experimental investigation of TiO_2 /water nanofluid laminar forced convective heat transfer through helical coiled tube. Heat Mass Transfer, 50 (11), 1563–1573, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1367-4>
- [6] H. S. Dizaji, S. Jafarmadar and M. Hashemian, The effect of flow, thermodynamic and geometrical characteristics on exergy loss in shell and coiled tube heat exchangers. Energy, 91, 678–684, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.084>

- [7] E. Izadpanah, A. Zarei, S. Akhavan and M. B. Rabiee, An experimental investigation of natural convection heat transfer from a helically coiled heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 93, 38–46, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.06.008>
- [8] M. Wang, M. Zheng, R. Wang, L. Tian, C. Ye, Y. Chen and H. Gu, Experimental studies on local and average heat transfer characteristics in helical pipes with single phase flow. *Annals of Nuclear Energy*, 123, 78–85, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.09.017>
- [9] B. K. Hardik, P. K. Baburajan and S. V. Prabhu, Local heat transfer coefficient in helical coils with single phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 522–538, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.069>
- [10] E. Neshat, S. Hossainpour and F. Bahirae, Experimental and numerical study on unsteady natural convection heat transfer in helically coiled tube heat exchangers. *Heat Mass Transfer*, 50 (6), 877–885, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1299-z>
- [11] K. E. Amori, Thermal and hydraulic characteristics of a novel helical coiled tube used as a heat exchanger. *Arab J Sci Eng*, 39 (5), 4179–4186, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1034-6>
- [12] S. S. Pawar and V. K. Sunnapwar, Studies on convective heat transfer through helical coils. *Heat Mass Transfer*, 49 (12), 1741–1754, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1210-3>
- [13] J. S. Jayakumar, S. M. Mahajani, J. C. Mandal, K. N. Iyer and P. K. Vijayan, CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes. *Computers & Chemical Engineering*, 34 (4), 430–446, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.008>
- [14] M. Moawed, Experimental study of forced convection from helical coiled tubes with different parameters. *Energy Conversion and Management*, 52 (2), 1150–1156, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.009>
- [15] C. Zhang, D. Wang, S. Xiang, Y. Han and X. Peng, Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in helically coiled tube with spherical corrugation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 13, 332–341, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.108>
- [16] D. G. Prabhanjan, T. J. Rennie and G. S. V. Raghavan, Natural convection heat transfer from helical coiled tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (4), 359–365, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.08.005>
- [17] J. Fernández-Seara, C. Piñeiro-Pontevedra and J. A. Dopazo, On the performance of a vertical helical coil heat exchanger. Numerical model and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 62 (2), 680–689, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.054>
- [18] Ö. Karabey ve A. Akkuş, Sürünme Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 369–376, 2022. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1030964>
- [19] ANSYS, ANSYS Fluent 18.2. ANSYS Inc., 2016.
- [20] R.A. Seban and E.F. McLaughlin, Heat transfer in tube coils with laminar and turbulent flow. *Int J Heat Mass Tran.*, 6, 387–395, 1963. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(63\)90100-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(63)90100-5)
- [21] S. S. Pawar and V. K. Sunnapwar, Experimental and CFD investigation of convective heat transfer in helically coiled tube heat exchanger. *Chemical Engineering Research and Design*, 92 (11), 2294–2312, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.01.016>





YouTube trend büyük veri kümelerinden ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi

Cross-country persistent tags discovery from YouTube trending video big dataset

Yeşim Dokuz^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

YouTube kolay kullanılan arayüzü ve büyük miktarda kullanıcı sayısı ile video paylaşım sosyal medya platformları arasında birinci video paylaşım platformudur. YouTube video veri kümelerinin büyük veri doğasından dolayı bu veri kümelerinin analizi ve bilgi çıkarımı, araştırmacılar ve kurum yöneticilerine YouTube kullanıcılarının sosyal eğilimleri hakkında fikir vermektedir. Ancak, YouTube büyük verilerinin analizi, görüntü ve ses işleme uygulamalarının zorluğu, semantik analiz metotlarını düzensiz YouTube içeriklerine uygulamanın zorluğu ve YouTube video veri kümelerinin büyük veri özelliği nedeniyle zordur. Literatürdeki çalışmalar video tavsiye sistemleri, YouTube yorumlarından semantik analizler ve trend video analizleri üzerine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, üç ülkeye ait YouTube trend video büyük verisi (Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve İngiltere) kullanılarak ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi için yeni bir metot ve algoritma önerilmiştir. Keşfedilen ülkeler arası kalıcı etiketler, bazı YouTube video etiketlerinin küresel olarak kullanıldığı, ancak bazı etiketlerin ise yalnız bir ülkede kullanıldığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: YouTube trend video analizi, Ülkeler arası kalıcı etiketler keşfi, Video etiket analizi, YouTube büyük veri analizi

1 Giriş

Bilgi teknolojileri ve web uygulamalarındaki son gelişmelerle birlikte, sosyal medya platformları kullanıcılar arasında büyük önem kazanmıştır. Bu platformlar arasında video içerik platformları önemli bir paya sahiptir. YouTube ise kolay kullanılan arayüzü ve büyük miktarda kullanıcı sayısı ile video paylaşım sosyal medya platformları arasında birinci video platformudur [1].

YouTube video veri kümelerinin analizi ve bilgi çıkarımı, araştırmacılar ve kurum yöneticilerine YouTube kullanıcılarının sosyal eğilimleri hakkında fikir vermektedir [2-4]. Özellikle, video içerikleri ve etiketleri videoyu yükleyen kullanıcıların düşünceleri ve fikirleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Kullanıcılara yeni video tavsiye sistemleri de YouTube video verilerinin analiziyle mümkün olmaktadır [5-8]. Nefret ve şiddet, kriminal içerikler ve diğer başlıklar YouTube video içeriklerinin analiziyle keşfedilebilmektedir [9-11].

Abstract

YouTube is the primary video content platform among video sharing social media platforms with its easy-to-use interface and huge number of users. Due to the big data nature of YouTube video datasets, analyzing and extracting knowledge from these datasets would provide insights into researchers and government directors on social orientation and tendency YouTube users. However, analyzing YouTube big datasets is challenging due to the difficulty of image and speech processing applications, the hardness of utilizing semantic analysis methods on irregular YouTube contents, and big data nature of YouTube video datasets. Literature studies focus on video recommendation systems, semantic analysis on YouTube comments and trending video analysis. In this study, a new method and an algorithm are proposed to discover cross-country persistent tags over YouTube trending video big dataset for three countries (United States of America, Canada, and Great Britain). The discovered cross-country persistent tags show that some YouTube video tags are globally utilized on videos, while some certain tags are utilized for only one country.

Keywords: YouTube trend video analysis, Cross-country persistent tags discovery, Video tag analysis, YouTube big data analytics

Ancak, YouTube videolarının analizi ve işlenmesinin çeşitli zorlukları bulunmaktadır. Birincisi, YouTube video veri kümeleri kullanılarak bilgi keşfi, görüntü ve ses işleme uygulamalarının zorlukları nedeniyle zordur. İkincisi, YouTube videolarındaki metinsel içeriklerden semantik analiz metotlarıyla bilgi keşfi düzensiz içerikler bulunması nedeniyle zordur. Üçüncüsü, YouTube video veri kümeleri doğası gereği büyük veri kaynaklarıdır ve yeni analiz metotları geliştirilmesi gerekmektedir.

Trend video analizi, YouTube trend videolarının analizini hedefleyen YouTube büyük veri analitiğinin önemli bir alanıdır. YouTube, her ülkedeki kullanıcılarının video izleme tercihlerine göre ülke tabanlı trend video listeleri üretmektedir. YouTube trend video büyük verisinin analizi, ülke bazında YouTube kullanıcılarının eğilimlerini ortaya çıkarmakta ve ülke bazında önemli videoların analizi, küresel önemli başlıkların keşfi ve ülkeler bazında trend etiketlerin keşfi başta olmak üzere çok çeşitli konularda fayda sağlamaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ytorun@ohu.edu.tr (Y. Dokuz)

Geliş / Received: 20.07.2023 Kabul / Accepted: 27.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1330386

Literatürde, YouTube trend video büyük veri kümelerinin analizini hedefleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Figueiredo vd. [12] YouTube videolarının yüklendikleri andan itibaren popülerite gelişimlerini karakterize etmek için gelişim örüntülerini analiz etmişlerdir. Chelaru vd. [13] beğenme, beğenmeme ve yorum sayısı gibi sosyal özelliklere dayalı olarak YouTube videolarının sıralanmasını yapmışlardır. Brodersen vd. [14] YouTube videolarını coğrafi olarak analiz ederek videoların popüleritesiyle lokasyonları arasında bir bağlantı olup olmadığını araştırmışlardır. Krishna vd. [15] YouTube videolarındaki trendler, mevsimsellik ve tahminleri keşfetmek için duygu analizi metotlarını kullanarak YouTube videolarındaki yorumları analiz etmişlerdir. Hoiles vd. [16] meta özelliklere ve sosyal dinamiklere dayalı olarak YouTube videolarının popüleritesini tahmin etmek için makine öğrenmesi algoritmalarını kullanmışlardır. Chen ve Chang [17] YouTube videolarının popüleritesinin erken tahmini için gözetimli öğrenme ve topluluk modeli tabanlı iki aşamalı bir çerçeve önermişlerdir. Gajanayake ve Sandanayake [18] oyun videolarındaki yorumları duygu analizi metotları ile analiz ederek videoları daha popüler hale getirmek için tavsiye sistemi geliştirmişlerdir. Dokuz [19] YouTube trend videolara ait bilgileri kullanarak popüler ve kalıcı etiketlerin keşfi için bir yöntem ve algoritma önermiştir.

Bu çalışmada, YouTube trend video büyük verisi kullanılarak birden fazla ülke üzerinde ülkeler arası kalıcı etiketler keşfedilmiştir. Aynı dili kullanmaları ve ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi bu sayede mümkün olacağı için Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve İngiltere olmak üzere üç ülke seçilmiştir. PPTagD algoritması her bir ülke üzerinde uygulanarak ülkeler için popüler ve kalıcı etiketlerin keşfi yapılmıştır. Daha sonra yeni bir yöntem ve algoritma kullanılarak ülkeler arası kalıcı etiketler keşfedilmiştir. Bu yöntemde, üç adet eşik değeri önerilmiş ve bu eşik değerleri kullanarak ülkeler arası kalıcı etiketleri keşfeden bir yöntem geliştirilmiştir. Keşfedilen ülkeler arası kalıcı etiketler bazı YouTube video etiketlerinin küresel olarak kullanıldığı ancak bazı etiketlerin ise yalnız bir ülkede kullanıldığı görülmüştür.

Bu çalışmanın devam eden kısımları şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2’de YouTube trend video büyük veri kümesi, temel tanımlar ve önerilen algoritma sunulmuştur. Bölüm 3’te önerilen algoritmanın sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Bölüm 4’te ise sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar sunulmuştur.

2 Materyal ve metot

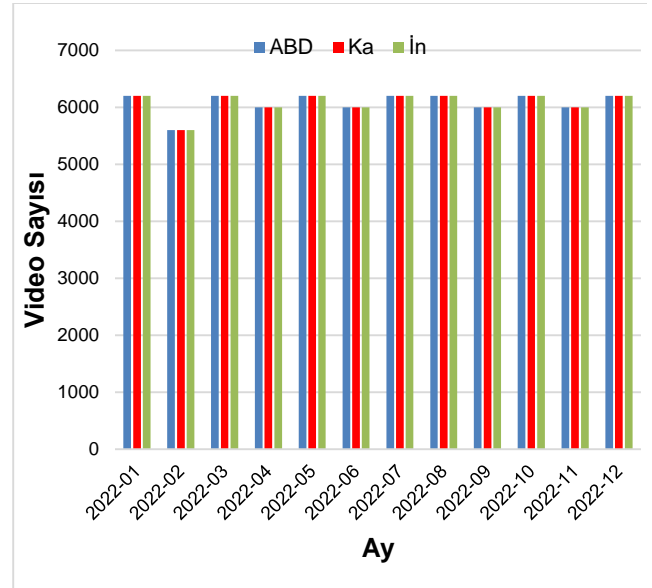
Bu bölümde öncelikle YouTube trend video büyük veri kümesi tanımlanmıştır. Daha sonra, temel tanımlar ve önerilen algoritma sunulmuştur.

2.1 YouTube trend video büyük veri kümesi

Bu çalışmada, 12 Ağustos 2020 tarihinden itibaren günlük trend videoları içeren YouTube trend video büyük veri kümesi kullanılmıştır [20]. Veri kümesinde Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve İngiltere de olmak üzere 11 ülkeye ait trend videolar bulunmaktadır. Veri kümesinde her bir videoya ait video başlığı, kategori numarası, etiketler,

beğenme sayısı, beğenmeme sayısı ve yorum sayısı gibi 16 parametre bulunmaktadır. Her gün için 200’e kadar günlük trend video verisi bulunmaktadır.

Bu çalışmada, ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi için Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve İngiltere (ABD, Ka, İn) trend video veri kümeleri ve 2022 yılına bir yıllık trend video kayıtları seçilmiştir. 2022 yılına ait Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve İngiltere veri kümelerindeki toplam video sayıları sırasıyla 72.999, 72.999 ve 72.998’dir. Veri kümelerindeki video sayılarının aylara göre gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Seçilen ülke veri kümeleri için aylar bazında video sayıları

2.2 Önerilen metot

Bu bölümde, önerilen ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi metodu ve algoritması sunulmuştur. İlk olarak temel tanımlar yapılmış, daha sonra önerilen algoritma sunulmuştur. Bu çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 2’de sunulmuştur.

Şekil 2’de görüldüğü üzere, ilk olarak Ülkeler YouTube trend video veri kümesi ön işlemden geçirilmekte ve her ülke için PPTagD algoritması çalıştırılmaktadır. Daha sonra, her bir benzersiz etiket için ülkeler arası etiket kalıcılığı değeri hesaplanmakta ve eğer etiketler verilmiş olan bir minimum eşik değerini sağlıyorsa ülkeler arası kalıcı etiketler listesine eklenmektedir. Son olarak ülkeler arası kalıcı etiketler listesi çıktı olarak verilmektedir.

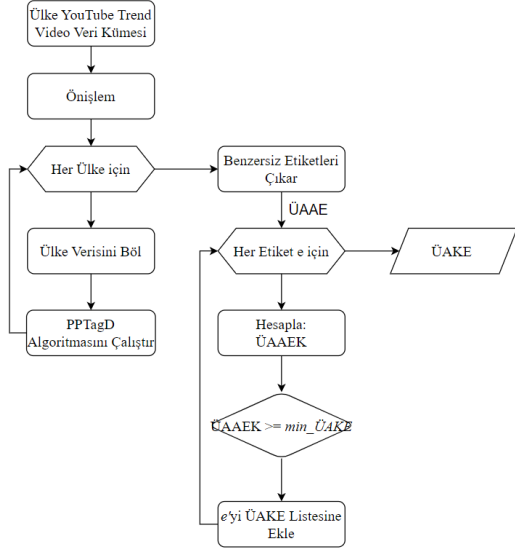
2.2.1 Temel tanımlar

Bu bölümde, ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi ile ilgili temel tanımlar sunulmuştur.

Tanım 1. Ülke YouTube Trend Video Büyük Veri Kümesi (ÜYTVK) birden fazla ülkenin YouTube üzerindeki günlük trend videolarına ait meta bilgilerini içeren veri kümesidir. Veri kümesine ait detaylar Bölüm 2.1’de sunulmuştur.

Tanım 2. Ülke Günlük Trend Video Etiket (ÜGTVE) ÜYTVK içerisinde bulunan bir ülkedeki günlük trend video ile ilişkili etikettir.

Tanım 3. Ülke Kalıcı Etiket (ÜKE) PPTagD algoritması [19] sonucu kalıcı etiket olarak keşfedilmiş olan etikettir.



Şekil 2. Bu çalışmaya ait akış diyagramı

Tanım 4. Ülke Kalıcı Etiketler Listesi (ÜKEL) ÜYTVK içerisinde bulunan her ülke için keşfedilmiş olan ÜKE listesidir.

Tanım 5. Ülkeler Arası Aday Etiketler (ÜAAE) ÜYTVK içerisindeki her bir ülke için keşfedilmiş olan benzersiz ÜKEL'dir.

Tanım 6. Ülkeler Arası Aday Etiket Kalıcılığı (ÜAAEK) verilen bir t etiketinin her bir ülkedeki etiket kalıcılığı değerlerinin ortalamasıdır.

$$\text{ÜAAEK}_t = \frac{\sum \text{ülke_etiket_kalıcılığı}_t}{\text{Veri kümesindeki ülke sayısı}} \quad (1)$$

Tanım 7. Ülkeler Arası Kalıcı Etiket (ÜAKE) verilen minimum ülkeler arası etiket kalıcılığı eşik değeri min_ÜAKE 'yi sağlayan aday etikettir.

$$\text{ÜAAEK}_t \geq \text{min_ÜAKE} \quad (2)$$

2.2.2 Önerilen ÜA-KE keşfi algoritması

Bu bölümde, ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi algoritması olarak hazırlanan Ülkeler Arası Kalıcı Etiket Keşfi (ÜA-KE Keşfi) algoritması sunulmuştur. Önerilen algoritma, sadece bir ülkeye ait popüler ve kalıcı etiketlerin keşfini yapmak için daha önce önerilmiş olan PPTagD algoritmasının [19] geliştirilmiş bir versiyonudur. Önerilen ÜA-KE Keşfi algoritması birden fazla ülkeye ait YouTube trend veri kümesini kullanarak kalıcı etiketlerin keşfini yapmaktadır. Önerilen ÜA-Ke Keşfi algoritmasına ait sözde kod Algoritma 1'de sunulmuştur.

Algoritma 1'de, 1. adımda ÜAKE ve Tum_Etiketler dizileri oluşturulmuştur. 2. adımda, Ülke YouTube Trend Video Büyük Veri Kümesi önişlemeden geçirilmektedir. 3. ve 8. adımlar arasında her bir ülke ayrı ayrı analiz edilmekte ve ülkelere ait kalıcı etiketler PPTagD algoritması [19] kullanılarak keşfedilmektedir. 5. adımda İşlenmiş_ÜYTVK veri kümesi kullanılarak ülke günlük veri kümesi çıkarılmaktadır. 6. adımda, PPTagD algoritması çalıştırılmakta ve ülkelere ait kalıcı etiketler listesi keşfedilmektedir. 7. adımda ülke kalıcı etiketler listesi ÜKEL Tum_Etiketler genel dizisine eklenmektedir. 9. adımda, her ülkeye ait kalıcı etiketlerin listelerini içeren Tum_Etiketler genel dizisindeki benzersiz etiketler çıkarılmaktadır. 10. ve 15. adımlar arasında, ülkeler arası aday etiketler analiz edilmekte ve min_ÜAKE 'yi sağlayıp sağlamadıkları değerlendirilmektedir. 11. adımda, ülkeler arası aday etiket kalıcılığı (ÜAAEK) hesaplanmaktadır. 12. adımda, üaae 'ye ait ÜAAEK kontrol edilmekte ve eğer min_ÜAKE 'ye eşit veya büyük ise, 13. adımda üaae ÜAKE dizisine eklenmektedir. Son olarak 16. adımda ÜAKE dizisi algoritmanın çıktısı olarak döndürülmektedir.

Algoritma 1. ÜA-KE Keşfi algoritması

Girdiler:

ÜYTVK: Ülke YouTube Trend Video Veri Kümesi
 min_popülarite : Minimum etiket popülaritesi eşik değeri
 min_kalıcılık : Minimum etiket kalıcılığı eşik değeri
 min_ÜAKE : Minimum ülkeler arası etiket kalıcılığı eşik değeri

Çıktı:

ÜAKE: Ülkeler arası kalıcı etiketler

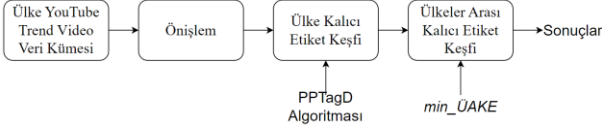
Algoritma:

1. ÜAKE = [], Tum_Etiketler = []
2. İşlenmiş_ÜYTVK = önişlem(ÜYTVK)
3. **for each** ülke $ü$ **in** ÜYTVK
4. ÜKEL = []
5. ülke_günlük_veri_kumesi = verikümesi_bol ($ü$, İşlenmiş_ÜYTVK)
6. ÜKEL = PPTagD(ülke_günlük_veri_kumesi, min_popülarite , min_kalıcılık)
7. Tum_Etiketler ← ÜKEL
8. **end for**
9. ÜAAE = benzersiz_popüler_etiketleri_çıkar (Tum_Etiketler)
10. **for each** ülkeler arası aday etiket üaae **in** ÜAAE
11. ÜAAEK = kalıcılık_hesapla (üaae , Tum_Etiketler)
12. **if** ÜAAEK \geq min_ÜAKE
13. ÜAKE ← üaae
14. **end if**
15. **end for**
16. **return** ÜAKE

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde önerilen ÜA-KE Keşfi algoritmasına ait sonuçlar ve değerlendirmesi sunulmuştur. Algoritmanın işlem zamanı performansı ve min_ÜAKE eşik değerinin algoritmaya etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, ABD, Kanada

ve İngiltere'ye ait ülkeler arası kalıcı etiketler sunulmuştur. Çalışmaya ait deneysel sistem Şekil 3'te sunulmuştur.



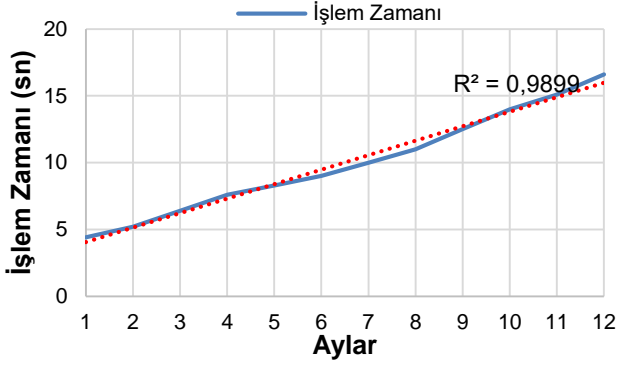
Şekil 3. Çalışmaya ait deneysel sistem

3.1 Deneysel sonuçları

Bu bölümde, önerilen algoritmaya ait deneysel sonuçlar sunulmuştur. İşlem zamanı performansı, $min_ÜAKE$ eşik değerinin etkisi ve keşfedilen sonuçları değerlendirmesi olmak üzere üç deney sunulmuştur.

3.1.1 İşlem zamanı performansı

Bu deneyde ÜA-KE Keşfi algoritmasının işlem zamanı performansı değerlendirilmiştir. Veri kümesindeki 12 ayın tamamı kullanılmış ve $min_popülarite$, $min_kalıcılık$ ve $min_ÜAKE$ eşik değerleri sırasıyla 0.025, 0.2 ve 0.2 olarak seçilmiştir. ÜA-KE Keşfi algoritmasının farklı aylara göre işlem zamanı performansı Şekil 4'te sunulmuştur.



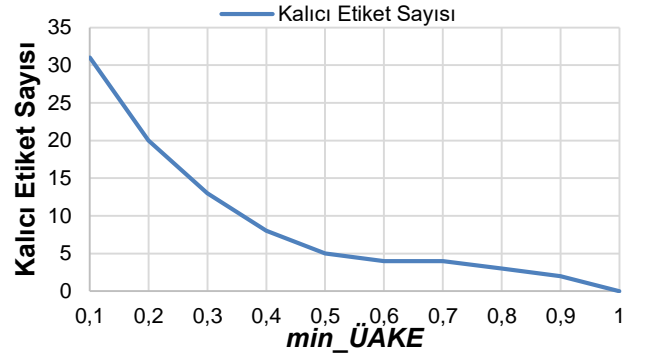
Şekil 4. ÜA-KE Keşfi algoritmasının işlem zamanı

Şekil 4'te görüldüğü üzere, ÜA-KE Keşfi algoritmasının işle zamanı, veri kümesindeki ayların sayısı arttıkça artmaktadır. Ayrıca, algoritmanın işlem zamanının 0.9899 R^2 değeriyle veri kümesinin artışına bağlı olarak lineer şekilde artmasıyla ise ÜA-KE Keşfi algoritmasının

ölçeklenebilir bir algoritma olduğunu göstermektedir. 12 aylık veri kümesinden 17 saniye içerisinde sonuçların elde edilebilmesi ise algoritmanın kullanılabilirliğini göstermektedir.

3.1.2 $min_ÜAKE$ Eşik değerinin etkisi

Bu deneyde, $min_ÜAKE$ eşik değerinin etkisi incelenmiştir. Veri kümesindeki 12 ayın tamamı kullanılmış ve $min_popülarite$ ve $min_kalıcılık$ eşik değerleri sırasıyla 0.025 ve 0.2 olarak seçilmiştir. $min_ÜAKE$ eşik değeri 0.1'den 1'e kadar 0.1'er artırılmıştır. $min_ÜAKE$ eşik değerinin etkisi Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. $min_ÜAKE$ eşik değerinin etkisi

Şekil 5'te görüldüğü üzere, $min_ÜAKE$ eşik değerinin artışıyla birlikte ülkeler arası kalıcı etiketlerin sayısı azalmaktadır. $min_ÜAKE$ eşik değerinin 0.1 ile 0.5 değerleri arasında azalma eğilimi daha yüksek iken, $min_ÜAKE$ eşik değerinin daha yüksek değerleri için azalma oranı düşmektedir. $min_ÜAKE$ eşik değeri 1 olduğu zaman hiçbir etiket ülkeler arası kalıcı etiket olarak keşfedilememektedir.

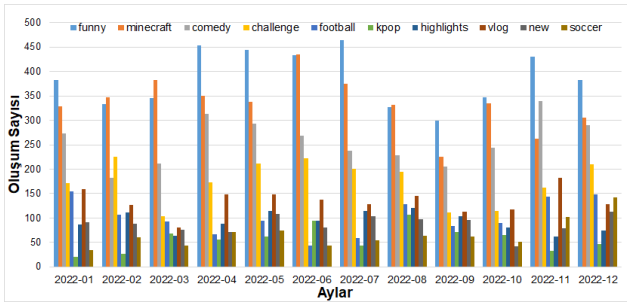
3.1.3 Algoritma sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu deneyde, ÜA-KE Keşfi algoritmasından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Veri kümesindeki 12 ayın tamamı kullanılmış ve $min_popülarite$, $min_kalıcılık$ ve $min_ÜAKE$ eşik değerleri sırasıyla 0.025, 0.2 ve 0.2 olarak seçilmiştir. Tablo 1'de ilk 10 ülkeler arası kalıcı etiket ÜAAEK değerleri ve her bir ülkedeki kalıcılık değerleriyle birlikte sunulmuştur.

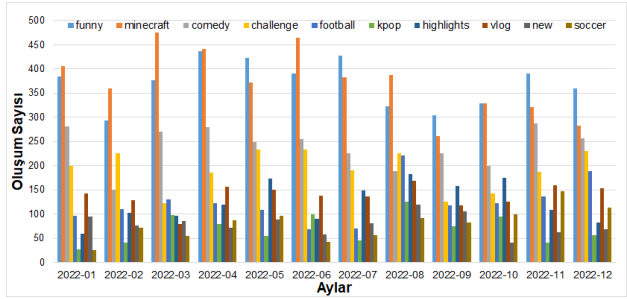
Tablo 1. İlk 10 ülkeler arası kalıcı etiket ve ülkelerdeki kalıcılık değerleri

Sıra	Etiket	ÜAAEK	ABD	Kanada	İngiltere
1	funny	0.995421	1	0.991758	0.994505
2	minecraft	0.945055	0.953297	0.961538	0.92033
3	comedy	0.893773	0.906593	0.892857	0.881868
4	challenge	0.748168	0.678571	0.777472	0.788461
5	football	0.554945	0.315934	0.447802	0.901099
6	kpop	0.437729	0.445055	0.436813	0.431319
7	highlights	0.434066	0.324176	0.425824	0.552198
8	vlog	0.401099	0.381868	0.406593	0.414835
9	new	0.386447	0.381868	0.35989	0.417582
10	soccer	0.340659	0.203297	0.247253	0.571429

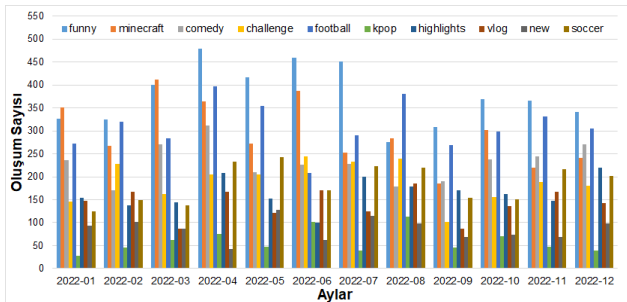
Tablo 1’de görüldüğü üzere, ilk dört etiket bütün ülkeler için oldukça yüksek etiket kalıcılık değerine sahiptir ve bu nedenle bu etiketlerin ÜAAEK değerleri daha yüksektir. Ancak, diğer etiketlerin ÜAAEK değerleri nispeten daha düşüktür. Ayrıca, ülkeler arası kalıcı etiketlerin sıralaması, her bir ülkedeki kalıcı etiketlerin sıralamasına uymamaktadır. Örneğin, *football* etiketi ABD ve Kanada’da daha düşük etiket kalıcılık değerine sahip iken İngiltere için oldukça yüksek etiket kalıcılık değerine sahiptir ve bu nedenle ülkeler arası kalıcı etiketler listesinde beşinci sırada bulunmaktadır. Benzer durum, *highlights* ve *soccer* etiketlerinde de bulunmaktadır. Keşfedilen etiketler değerlendirildiği zaman, elde edilen sonuçların [19]’daki 2021 yılına ait veri kümesindeki ABD sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. ABD için kalıcı etiketlerin aylara göre dağılımı



Şekil 7. Kanada için kalıcı etiketlerin aylara göre dağılımı



Şekil 8. İngiltere için kalıcı etiketlerin aylara göre dağılımı

Şekiller 6-8’de ülkeler arası kalıcı etiketlerin her bir ülkedeki aylara göre dağılımı sunulmuştur. Şekillerde görüldüğü üzere, tüm etiketlerin ülkelere göre farklı bir dağılımı olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, ABD ve İngiltere’de *funny* etiketi diğer etiketlere karşı önemli bir

üstünlüğü bulunmakta iken Kanada’da *funny* ve *minecraft* etiketleri farklı aylarda diğer etiketlere karşı üstünlük göstermektedir. *football* ve *soccer* etiketleri İngiltere’de belirli aylarda önemli bir paya sahip iken ABD ve Kanada’da bu etiketlerde anlamlı bir artış gözlemlenmemektedir. Bu sonuç, *football* ve *soccer* etiketlerinin İngiltere’de ABD ve Kanada’ya göre daha yaygın kullanıldığını göstermektedir. Şekillerden gözlemlenen bir diğer durum ise, İngiltere’de etiketlerin oluşum sayıları ABD ve Kanada’ya göre daha düşük olmasıdır. Bu durum etiketlerin İngiltere’de, ABD ve Kanada’ya göre daha düzgün dağıldığını ve ilk 10 dışındaki etiketlerin de belirli bir miktar paya sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Tek bir ülkede keşfedilen bağımsız etiketler

ABD	Kanada	İngiltere
hip hop	shorts	sidemen
news	fortnite	premier league
comics		ksi
records		sport
simon cowell		action
		formula 1
		formula one
		pop
		grand prix
		sky sports
		miniminter
		music video
		auto racing

Tablo 2’de sadece bir ülkede keşfedilen bağımsız etiketler sunulmuştur. Tablo analiz edildiği zaman İngiltere’nin ABD ve Kanada’ya göre çok daha fazla bağımsız etikete sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, bağımsız etiketlerin içerikleri incelendiği zaman, İngiltere’deki videoların YouTube etiketlerini kullanmada farklı konulara, futbol, formula 1 ve oto yarışları gibi, odaklandığı görülmektedir. Bununla birlikte, ABD ve Kanada’nın diğer ülkelerden farklılaştığı bir konu kesin olarak keşfedilmemiştir. Burada ABD ve Kanada’nın sınır komşusu olmaları ve benzer YouTube kullanımına sahip olmalarının etkisi olabileceği düşünülmektedir.

4 Sonuçlar

YouTube, kolay kullanımı ve çok fazla kullanıcı sayısı ile video içerik platformları arasında birinci platform olarak sosyal medya kullanıcıları arasında kabul görmüş bir platformdur. YouTube büyük verilerinin analizi için yeni tekniklerin kullanılması gitgide yaygınlaşmakta ve YouTube kullanıcılarının eğilimleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Özellikle video içerikleri ve etiketleri video sahipleri ve onların düşünceleri hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Bu çalışmada, birden fazla ülke arasından, ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi için YouTube trend video büyük veri

kümesi kullanılmıştır. Aynı dili kullandıkları için ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi mümkün olabileceğinden dolayı ABD, Kanada ve İngiltere seçilmiştir. Daha önce önerilmiş olan PPTagD algoritması her bir ülke için uygulanmış ve her bir ülke için popüler ve kalıcı etiketler keşfedilmiştir. Daha sonra, yeni bir yöntem ve algoritma önerilerek ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi yapılmıştır. Keşfedilen ülkeler arası kalıcı etiketler, bazı etiketlerin videolarda küresel olarak kullanıldığını, ama bununla birlikte bazı etiketlerin sadece bir ülkede kullanıldığını göstermektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, video içeriklerini de dikkate alan bir yöntem ile ülkeler arası kalıcı etiketlerin keşfi yapılması planlanmaktadır. Ayrıca İngilizce dışındaki diğer dillerdeki veri kümeleri üzerinde de önerilen algoritma kullanılarak kalıcı etiketlerin keşfi yapılabilir.

Teşekkür

Bu araştırma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: MMT2023/1-BAGEP

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] Oberlo, Oberlo YouTube statistics. <https://www.oberlo.com/blog/youtube-statistics>, Accessed 2023.
- [2] R. Novendri, A. S. Callista, D. N. Pratama, and C. E Puspita, Sentiment analysis of YouTube movie trailer comments using Naïve Bayes. *Bulletin of Computer Science and Electrical Engineering*, 1, 1, 26–32, 2020. <https://doi.org/10.25008/bcsee.v1i1.5>
- [3] M. Alkaff, A. R. Baskara and Y. H. Wicaksono, Sentiment analysis of Indonesian movie trailer on YouTube using Delta TF-IDF and SVM. 2020 5th International Conference on Informatics and Computing, pp. 1–5, Gorontalo, Indonesia, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIC50835.2020.9288579>
- [4] S. Singh and G. Sikka, YouTube sentiment analysis on US elections 2020. ICSCCC 2021 -International Conference on Secure Cyber Computing and Communications, pp. 250–254, Jalandhar, India, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICSCCC51823.2021.9478128>
- [5] M. Yan, J. Sang and C. Xu, Unified YouTube video recommendation via cross-network collaboration. ICMR 2015- Proceedings of the 2015 ACM International Conference on Multimedia Retrieval, pp. 19–26, Shanghai, China, 2015. <https://doi.org/10.1145/2671188.2749344>
- [6] P. Covington, J. Adams and E. Sargin, Deep neural networks for YouTube recommendations. Proceedings of the 10th ACM Conference on Recommender Systems, pp. 191–198, Boston, Massachusetts, USA, 2016. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1145/2959100.2959190>
- [7] R. Zhou, D. Xia, J. Wan and S. Zhang, An intelligent video tag recommendation method for improving video popularity in mobile computing environment. *IEEE Access*, 8, 6954–6967, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961392>
- [8] Q. Liu, R. Xie, L. Chen, S. Liu, K. Tu, P. Cui, B. Zhang and L. Lin, Graph neural network for tag ranking in Tag-enhanced video recommendation. *International Conference on Information and Knowledge Management, Proceedings*, 1, pp. 2613–2620, Ireland, 2020. <https://doi.org/10.1145/3340531.3416021>
- [9] S. Agarwal and A. Sureka, A focused crawler for mining hate and extremism promoting videos on YouTube. HT 2014- Proceedings of the 25th ACM Conference on Hypertext and Social Media, pp. 294–296, Santiago, Chile, 2014. <https://doi.org/10.1145/2631775.2631776>
- [10] A. Matamoros-Fernández, Platformed racism: the mediation and circulation of an Australian race-based controversy on Twitter, Facebook and YouTube. *Information Communication and Society*, 20, 6, 930–946, 2017. <https://doi.org/10.1080/1369118X.2017.1293130>
- [11] R. Ottoni, E. Cunha, G. Magno, P. Bernardina, W. Meira Jr. And V. Almeida, Analyzing Right-wing YouTube channels: Hate, violence and discrimination. Proceedings of the 10th ACM Conference on Web Science, pp. 323–332, Amsterdam, Netherlands, 2018. <https://doi.org/10.1145/3201064.3201081>
- [12] F. Figueiredo, F. Benevenuto and J. M. Almeida, The tube over time: Characterizing popularity growth of YouTube videos. Proceedings of the 4th ACM International Conference on Web Search and Data Mining, pp. 745–754, Hong Kong, China, 2011. <https://doi.org/10.1145/1935826.1935925>
- [13] S. V. Chelaru, C. Orellana-Rodriguez and I. S. Altingovde, Can social features help learning to rank YouTube videos? Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 7651 LNCS, pp. 552–566, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35063-4_40
- [14] A. Brodersen, S. Scellato and M. Wattenhofer, YouTube around the world: Geographic popularity of videos. WWW'12- Proceedings of the 21st Annual Conference on World Wide Web, pp. 241–250, Lyon France, 2012. <https://doi.org/10.1145/2187836.2187870>
- [15] A. Krishna, J. Zambreno and S. Krishnan, Polarity trend analysis of public sentiment on YouTube. The 19th International Conference on Management of Data (COMAD), pp. 125–128, Ahmedabad, India, 2013.
- [16] W. Hoiles, A. Aprem and V. Krishnamurthy, Engagement and popularity dynamics of YouTube videos and sensitivity to Meta-Data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 29, 7, 1426–1437, 2017. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2017.2682858>

- [17] Y. L. Chen and C. L. Chang, Early prediction of the future popularity of uploaded videos. *Expert Systems with Applications*, 133, 59–74, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.015>
- [18] G. M. H. C. Gajanayake and T. C. Sandanayake, Trending pattern identification of youtube gaming channels using sentiment analysis. *20th International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions, ICTer 2020- Proceedings, ICTer*, pp. 149–154, Colombo, Sri Lanka, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICTer51097.2020.9325476>
- [19] Y. Dokuz, Discovering popular and persistent tags from YouTube trending video big dataset. *Multimedia Tools and Applications*, 1-19, 2023. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-023-16019-z>
- [20] R. Sharma, YouTube Trending Video Dataset. <https://www.kaggle.com/rsrishav/youtube-trending-video-dataset>, Accessed 2022





A new bearing fault diagnosis approach based on common spatial pattern features

Ortak uzamsal örüntü özniteliklerine dayalı yeni bir rulman arızası teşhisi yaklaşımı

Nurhan Gürsel Özmen¹ , Yunus Emre Karabacak^{2,*} 

^{1,2} Karadeniz Technical University, Department of Mechanical Engineering, 61080, Trabzon, Türkiye

Abstract

Condition monitoring in machines holds significant importance for early fault detection, optimizing maintenance processes, and ensuring operational continuity. In this study, a novel intelligent detection approach for rolling bearings is introduced, utilizing the Common Spatial Pattern (CSP) method to extract distinctive features related to bearing faults. By maximizing the variance ratio of signal matrices from distinct sources, CSP sets itself apart from conventional frequency-based features. This technique captures characteristic vibration patterns unique to each measurement, enabling differentiation between faulty and healthy bearings. The effectiveness of the proposed method was assessed using Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), and K-Nearest Neighbour (k-NN) algorithms across two diverse datasets. The results indicated an 88.5% accuracy in two-class fault detection and 93.5% in fault classification when employing ANN. Comparison with traditional time domain feature sets highlighted the superior performance of CSP features, exhibiting elevated accuracy rates in both two-class and multiclass scenarios. Thus, CSP features emerge as a promising avenue for effectively monitoring bearing conditions through vibration data.

Keywords: Common spatial pattern, Bearings, Condition monitoring, Vibration signals

1 Introduction

Bearings are basic machine elements commonly used in rotating machinery such as in aviation, turbines, agricultural equipment, and motor vehicles. They can carry high dynamic loads that occur during the operation of the machines and are transmitted around the rolling element bearings [1]. Therefore, any failure in a bearing can cause serious problems that may lead to production deficiency and financial loss. Bearings often operate for long hours in harsh environments and frequently lose performance or break down [2]. It has been highlighted that a considerable portion of breakdowns in rotating machines is attributed to faulty bearings [3]. Hence, it is very important to study the condition monitoring of bearings for reducing operating costs and preventing industrial accidents.

Öz

Makinelerde durum izleme, erken arıza tespiti, bakım süreçlerinin optimize edilmesi ve iş sürekliliğinin sağlanması açısından büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, rulmanlar için yeni bir akıllı tespit yaklaşımı sunulmuş, rulman arızalarıyla ilgili ayırt edici öznitelikleri çıkarmak için Ortak Uzamsal Örüntü (OUÖ) yöntemi kullanılmıştır. Farklı kaynaklardan gelen sinyal matrislerinin varyans oranını maksimize eden OUÖ, geleneksel frekans temelli özniteliklerden ayrılır. Bu teknik, her ölçümde benzersiz titreşim desenlerini yakalayarak arızalı ve sağlam rulmanlar arasındaki farkı belirlemeyi sağlar. Önerilen yöntemin etkinliği Yapay Sinir Ağı (YSA), Destek Vektör Makinesi (DVM) ve K-En Yakın Komşu (k-YK) algoritmaları kullanılarak iki farklı veri kümesinde değerlendirildi. Sonuçlar, YSA kullanıldığında iki sınıflı arıza tespitinde %88.5 doğruluk ve arıza sınıflandırmasında %93.5 doğruluk elde edilebileceğini gösterdi. Geleneksel zaman alanı öznitelikleri ile yapılan karşılaştırma, OUÖ özniteliklerinin üstün performansını ortaya koydu. OUÖ iki sınıflı ve çoklu sınıflı senaryolarda yüksek doğruluk oranları sergiledi. Böylece, OUÖ öznitelikleri titreşim verileri aracılığıyla rulman arızalarının etkili bir şekilde tespit edilmesi için umut verici bir yol olarak ortaya çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler: Ortak uzamsal örüntü, Rulmanlar, Durum izleme, Titreşim sinyalleri

Bearings produce noise and vibration due to their changing working conditions or due to any damage to the body. The radial loading of bearings may cause vibration even when they are geometrically perfect [4]. The oscillations may increase due to a defect [5]. In the rotating machinery industry, a vast number of condition-based strategies have been invented to describe the occurrence of faults [6]. The signal characteristics of a faulty bearing are generally non-stationary and multi-component which makes it difficult to identify from the raw signal accurately. Various techniques have been improved to detect failures in bearings [7].

In recent years, the analysis of vibration signals has become one of the most preferred and efficient methods used for detecting faults in bearings [8]. A large number of

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: karabacak@ktu.edu.tr (Y. E. Karabacak)
Geliş / Received: 21.07.2023 Kabul / Accepted: 05.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1330864

diagnosis strategies have been recommended for vibration signal analysis [9], combining various feature extraction and classification methods for machine faults [10]. Feature extraction is considered the main distinguishing point in bearing fault diagnosis which is a crucial step for time domain, frequency domain, or both domains data by removing the noise and gathering the subject-specific information. Various methods, such as wavelet denoising [11], empirical mode decomposition [12], and time-frequency manifolds [13], have already been used to filter the noise and obtain satisfactory results. Among them, the wavelet denoising method is more efficient and usable. In frequency domain analysis [14], the repetition frequencies of the impulse response series, which arise both from the passage of the fault in and out of the load zone are observed by several mathematical methods. Among them, the spectral representation of signals and the Fourier transform are the most preferred, easy-to-apply algorithms [15]. Moreover, Kalman filtering [16], the spectrogram [17], empirical mode decomposition [18], multiscale permutation entropy [19], the envelope spectrum [20], the adaptive spectral kurtosis [21], the cyclic spectral correlation and coherence [22] and the negentropy [23] are some of the other commonly used algorithms. The defect frequency extraction is not very efficient in rolling bearings with a low signal-noise ratio (SNR). It is stated that the impulse energy of the defective bearing is kept in the machine noise and the fault frequency can not be observed in the envelope spectrum [24]. In this case, besides the frequency range of the impact location, the exact time of emergence of the impact is also necessary. Therefore, time-frequency analysis like wavelet transform [25] and its combinations with envelope spectrum [26], multi-scale morphological filters [27], adaptive mode decomposition [28], multiscale complexity analysis [29], autoregressive model [30] and Wigner-Ville analysis [31] are the other methods that were used. However, if the fault signals are weak, these methods may not work.

Since the signal characteristics and the processing methods have much in common, feature extraction techniques used in biomedical signal analysis have found themselves a way into rotating machinery analysis. Therefore, we proposed the Common Spatial Pattern (CSP) method, which is considered a powerful feature extraction method in the electroencephalogram (EEG) processing for Brain-Computer Interfaces (BCI) for the vibration data of bearings [32]. The method of common spatial patterns (CSP) implements spatial filters by computing the variances in the filtered time series for optimal discrimination [33]. Spatial filtering can significantly enhance the discrimination ability while separating the signal from the noise. In a recent study by Karabacak and Özmen [34], CSP has become successful in diagnosing the faults of worm gearboxes under different working conditions. In a study by Li et al. [35], a variational mode decomposition and high dimensional Common Spatial Pattern-based feature extraction are utilized for rolling bearings.

Although bearing diagnostics are widely studied and many methods have been developed for them, due to the improvements in the feature extraction of various signals,

new methods are being introduced to the condition monitoring of bearings. In this study, we have tested the CSP method on the Case Western Reserve University (CWRU) Bearing Data [36,37] and the University of Ferrara, Italy, Engineering Department Data [38], to classify healthy and faulty bearings. ANN, SVM, and k-NN are used to train CSP features and then to classify the faults [39]. The results of the study were given comparatively by accuracy metrics. The results of the study were given comparatively by SVM and k-NN by accuracy metrics. Furthermore, classical time domain features and the high distinguishing capability of the CSP features were compared and the results are presented.

Support Vector Machine (SVM), Naive Bayes, K-Nearest Neighbor (k-NN), Random Forest, Decision Trees, and Deep Learning methods are the frequently used machine learning algorithms in fault detection of machinery [40]. The superiority of Artificial Neural Networks (ANN) and SVM has been proven in rotating machines [41]. Newly, Deep Learning (DL) based solutions like Convolutional Neural Networks (CNNs) have also been tried for fault diagnosis of bearings [42]. Deep learning and ensemble learning techniques have some limitations. A reasonable amount of data gathering and complex analyzing methods with their tuning is still a problem to handle which can be handled in future studies [43].

In the study by Zhao et al. [44], bearing fault diagnosis was performed using transfer learning and an optimized deep belief network. The effectiveness of the proposed approach was validated using vibration data from a rotating machinery. In the research conducted by Kaya et al. [45], they introduced a novel approach for feature extraction in bearing fault classification. Their method involved utilizing one-dimensional gray-level co-occurrence matrices. Upon subjecting the signals to their proposed model, the achieved success rates were notably high across various datasets. In the study conducted by Bayram et al. [46], the impact of bearing faults on coefficients obtained through wavelet transform was investigated. Through a series of experimental studies, it was concluded that the approach reliant on wavelet transform coefficients effectively achieves the classification of distinct types of bearing faults. In their study, Kaya et al [47], introduced a novel method for automated diagnosis of bearing fault sizes. This method involves the utilization of time-frequency images generated through Continuous Wavelet Transform (CWT), coupled with deep transfer learning techniques. In his research, Kuncan [48] presented an intelligent methodology for bearing fault diagnosis that involves the integration of two distinct techniques: one-dimensional local binary pattern analysis and gray relational analysis. In the study conducted by Yang et al. [49], the focus was on the interpretability of deep convolutional neural networks (CNNs) in the context of rolling bearing fault diagnosis.

Up to now, many methods have been presented for condition monitoring some of which were for constant operational conditions and therefore do not represent the real working conditions in industrial applications [50]. In [51], it is stated that there is a need for a benchmark study that applies novel diagnostic algorithms and they have presented

some solid results. They suggested that the researchers propose novel methods and propose the superiority of their algorithm against the Randall results or similar results with cost-effective methods. Therefore, in this study, we used the Common Spatial Pattern method as a new diagnosing tool to distinguish bearing faults, which is a powerful feature extraction technique in EEG signal processing. To give a better diagnosis for datasets, the CSP-based approach can overcome the confusion created by the nonlinearity and the inadequacy of classical methods such as statistical features and envelope analysis. Moreover, it is computationally simple and efficient. The study is unique in its use of CSP features for the fault detection of bearings and performing a remarkable classification performance when compared to the state-of-the-art methods.

The remainder of this paper is presented in the following manner. In Section 2, the data sets are introduced and the theoretical background of CSP is given. Section 3 presents the results of both data sets with the proposed models. The Conclusions are given in the final chapter Section 4.

2 Materials and methods

2.1 The ball bearing and its geometry

Bearings are precision-manufactured machine elements that enable machines to work efficiently at high speeds and to carry heavy loads safely. As there are balls placed between the inner and outer races of rolling elements, they can carry axial or radial loads with minimum torsional friction. Deep groove ball bearings are the simplest type of bearings commonly used in industry. The main parts of the ball bearings such as the inner, and outer races, balls, the cage, and the shaft are given in Figure 1 [52].

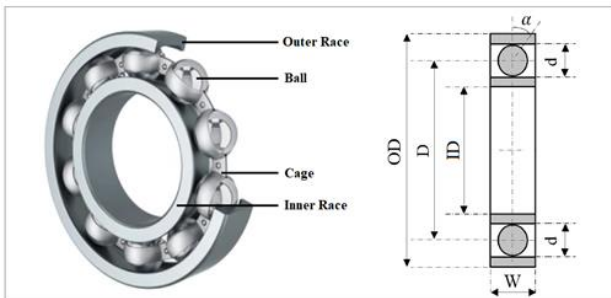


Figure 1. Fundamental dimensions of Deep-groove bearing (OD: outer race diameter; D: pitch diameter; ID: inner diameter or bore diameter; d: rolling element diameter, W: raceway width, α : contact angle [52])

During the rotation of a ball bearing, the outer race is fixed while the inner race and balls move. The correct alignment and placement are very important for the maximum lifespan of this equipment, if not, several kinds of defects can occur such as cracks or pits on moving surfaces or bearing elements, or other harms such as roughness or misaligned races may occur. The cracks or pits may be observed on the inside of the outer race such that is forced with higher loads. On the other hand, the inner race faults can be observed at any point of the race due to rotation.

2.2 The Case Western Reserve University dataset (CWRU)

In this study, we used the Case Western Reserve University (CWRU) vibration data [51]. In Figure 2 the test system is shown which has a 2 hp Reliance Electric motor with a torque sensor and encoder fixed on it. Torque is supplied from a dynamometer and an electronic control unit. The CWRU Bearing Data Center website has details about the test system [36].

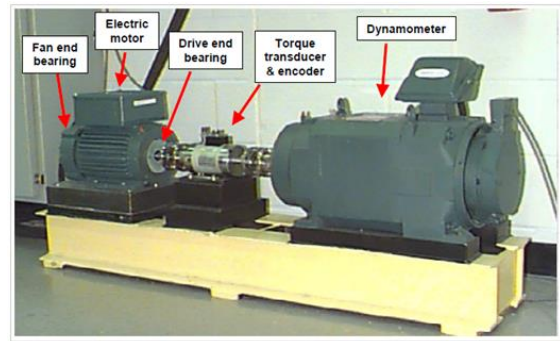


Figure 2. The bearing test rig [51]

The data were obtained for many different conditions and 161 datasets were formed. We used the dataset from Table 3, 48k drive end bearing fault data with 48 kHz sampling frequency, containing 1 healthy and 3 defective bearings (6203-2RS). They are denoted as HB (healthy bearing), FB1 (bearing with outer race fault), FB2 (bearing with inner race fault), and FB3 (bearing with rolling element fault). The speed of the shaft in the experimental setup was approximately 6 Hz for all signals, and the sampling frequency was 48000 samples/s. The signal length is 200000 samples for each bearing [51]. Table 1 shows the fundamental specifications of the bearings.

A reasonable amount of vibration can be observed in ball bearings; even if they are perfectly aligned and fixed. The vibration level may increase if there is any fault in one of the elements of the ball bearing. Figure 3 shows common bearing faults.

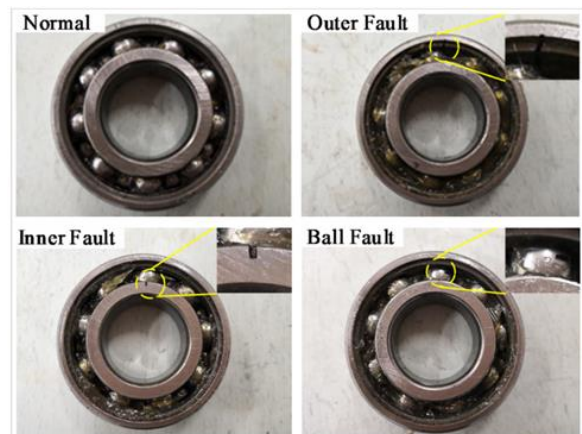


Figure 3. Pictures of HB (healthy bearing), FB1 (bearing with outer race fault), FB2 (bearing with inner race fault), and FB3 (bearing with rolling element fault) [42]

Table 1. Fundamental dimensions of the test bearings [51]

Symbol	Explanation	Value
D	Pitch diameter	38.5 [mm]
ID	Inner diameter	25 [mm]
OD	Outer race diameter	52 [mm]
d	Rolling element diameter	7.12 [mm]
W	Raceway width	15 [mm]
n	The rolling element number	12 [-]
α	The angle of contact	0 [°]

2.3 The University of Ferrara dataset

The second data set is from the The University of Ferrara, Department of Engineering from Italy [38]. This dataset comprises the vibration data obtained throughout a test study on bearings defined by artificial faults on the outer ring. Vibration signals were obtained for several working statuses. These were described by various values of implemented load, shaft rotation speed, and fault size. The test rig is given in Figure 4. The bearing faults utilized in the experiments can be seen schematically in Figure 5. The test bearing is mounted on the shaft end and enclosed in a housing. Apart from the test bearing, two bearings are utilized as supporting bearings. There is a coupling between the support bearings and the electric motor. An inverter controls the speed of the electric motor. Different loads can be implemented to the test bearing in the vertical direction. The acceleration signals are obtained using a data collection system and a sensor mounted on the test bearing [38].

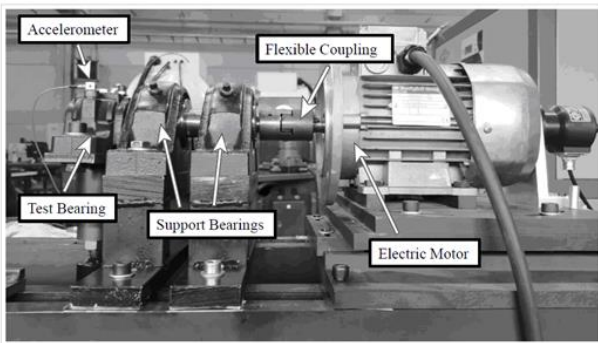


Figure 4. The University of Ferrara bearing test rig [38]

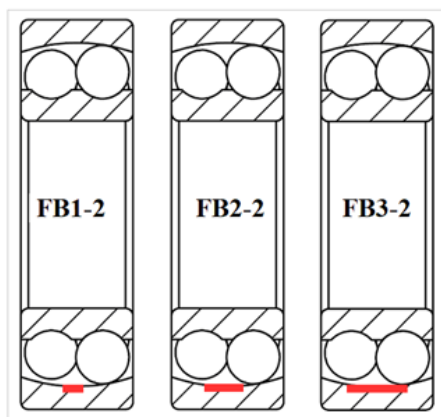


Figure 5. The University of Ferrara dataset fault types

Bearings with different fault sizes (FB1-2, FB2-2, and FB3-2) were tested under various combinations of applied

loads and shaft rotational speeds, and vibration data were collected. Faults in the outer ring of the bearings were artificially made by the electric discharge process. The sampling frequency of each signal is 51.2 kHz and the measurement time is 15 s [38].

2.4 Methodology

The data sets are evaluated separately. According to the flowchart in Figure 6, the raw data is preprocessed then the feature extraction is applied. After that, the feature sets are sent to the classifiers in order to detect healthy and faulty bearings with different defect types.

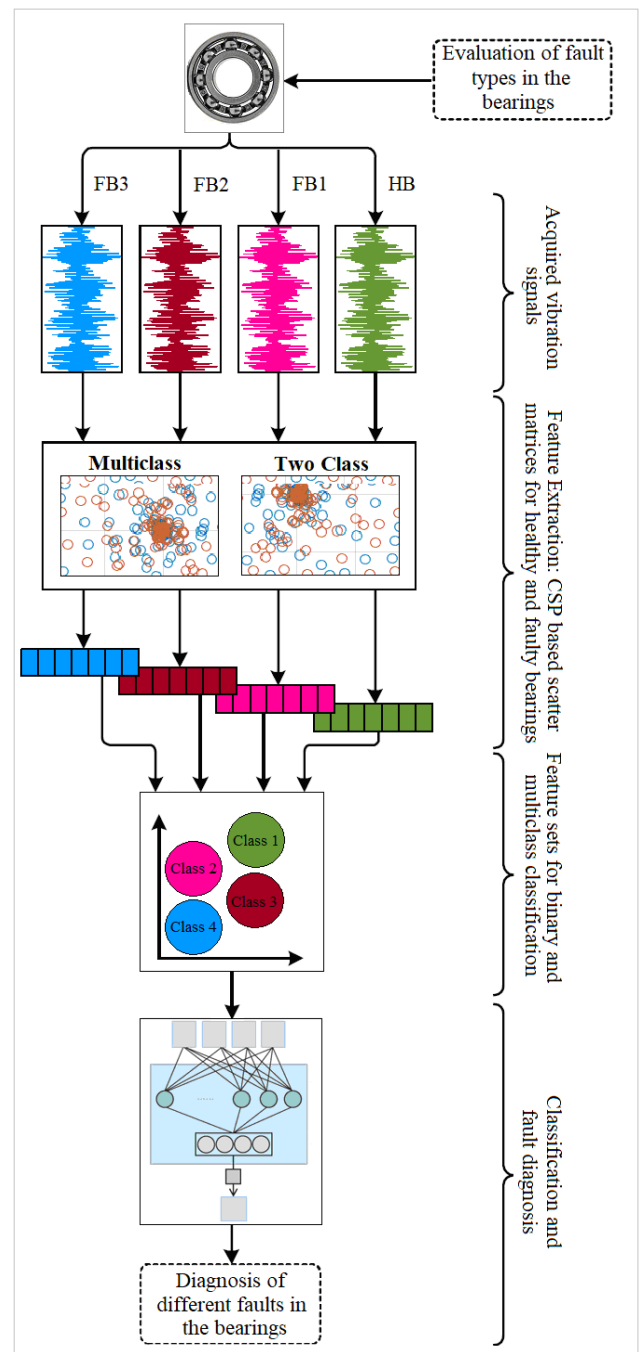


Figure 6. The bearing fault detection flowchart

2.4.1 Feature extraction with Common Spatial Pattern (CSP)

In signal processing, the CSP method separates a multivariate signal with maximum distinctions in variance between two windows. It is efficiently used in maximizing the variance ratio of the two-class signal matrices in EEG signal processing and it can be applied to two or multi-class classification problems. If X_1 and X_2 are the estimates of the covariance matrices of classes 1 and 2 respectively, then the CSP algorithm uses the simultaneous diagonalization of two covariance matrices (X_1, X_2). This can be implemented mathematically by solving the eigenvalue decomposition problem [53].

In Equation (1), P is the CSP projection matrix ($P \in R^{NXN}$), and it obtains the features whose variances are best for classifying two classes of signals. The rows of P are fixed spatial filters, and CSP can be calculated from rows of P^{-1} . D is a diagonal matrix and involves the eigenvalues of X_1 . For each j^{th} attempt of the vibration signal, $V_j \in R^{NXT}$ is converted into a low-dimensional subspace with the projection matrix (P). Here, V_j is the matrix composed of vectors of vibration signals. Besides, N denotes the number of vibration signals and T represents the number of samples per trial. In Equation (2), the linear transformation of the j^{th} trial is given. Here $S_j \in R^{NXT}$ is used to show the spatially filtered data, and these signals maximize the difference in the variance of two classes of vibration data [53].

$$X_1 P = (X_1 + X_2) P D \quad (1)$$

$$S_j = P V_j \quad (2)$$

The subsets of the data are selected from the n pairs of the first and last rows of S_j . If $S_f \in R^{2nxT}$ are the first and last rows of S_j , then the variance of S_f forms the feature vector for the j^{th} trial. Accordingly, f_j can be written as in Equation (3) ($n=2$ and $f_j \in R^{2n}$). Here, f_j denotes the two-class features for one class versus another class for the j^{th} trial [53].

$$f_j = \log \left[\frac{\text{var}(S_f)}{\sum_{j=1}^{2n} \text{var}(S_f)} \right] \quad (3)$$

Figure 7 shows the distribution of samples of two classes before and after CSP filtering. The red and blue circles are plotted on Gaussian distributions of healthy and faulty bearing sets. In (a), the distribution of prefiltering is shown. In (b), the distribution after the filtering is given. The samples in Figure 7(a) are mapped to the ones in Figure 7(b) by CSP where the two distributions are completely different

along the new axes. The estimated covariances show the direction of CSP projections. It is clear that the two classes are independent of each other, that is, they are different classes. Therefore, the horizontal (vertical) axis represents the highest variance in the red (blue) class and oppositely the smallest in the blue (red) class [54].



Figure 7. (a) Distribution of vibration data before CSP filtering (b) Distribution of vibration data after CSP filtering

2.4.2 Fault detection

After the 2000s, ANN has become a superb machine learning technique. It is commonly applied to many engineering problems from modeling to classification. There are many studies in the literature on the condition monitoring of rotary machines and bearing fault detection [55].

A representative ANN is shown in Figure 8 containing two hidden layers. The parameters, x_1, x_2 and x_3 represent the inputs, and y represents the output. A mathematical function is defined as in Equation (4) for the relation between the output and inputs. f is the activation function of the network, and b is a fixed quantity. The classifier parameter or weight is shown by W produced after an iterative training process [43].

$$y = f(W^T x) = f \left(\sum_{i=1}^3 W_i x_i + b \right) \quad (4)$$

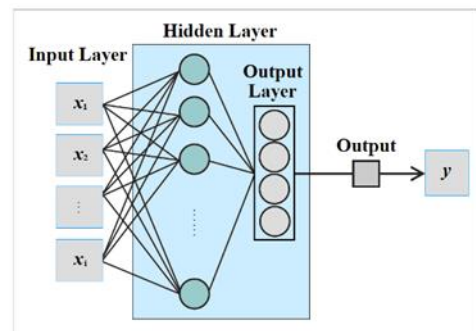


Figure 8. Two hidden layers of the ANN

The dataset containing vibration data CSP features is used in the detection of bearing faults with two-class or multi-class ANN classifiers. For this purpose, the binary classification contains six pairs where the ANN outputs are labeled as healthy and faulty bearing pairs (Table 2). The datasets are partitioned as 70% training, 15% validation, and 15% test. In multiple classifications, the one versus rest-voting strategy is used to obtain the four classes of all bearing types (Table 2).

Table 2. Binary and multiclass CSP pairs for machine learning algorithms

CWRU Two-class Classification Pairs	HB vs FB1	HB vs FB2	HB vs FB3	FB1 vs FB2	FB1 vs FB3	FB2 vs FB3
The University of Ferrara Two-class Classification Pairs	FB1-2 vs FB2-2		FB1-2 vs FB3-2			FB2-2 vs FB3-2
CWRU Multiclass Classification	HB, FB1, FB2, FB3			FB1, FB2, FB3		
The University of Ferrara Multiclass Classification Pairs	FB1-2, FB2-2, FB3-2			FB2-2, FB3-2		FB1-2, FB2-2

We used a feedforward ANN algorithm with a hidden and output layer both binary and multiple classification processes. In most ANN problems, using a single hidden layer is usually sufficient to solve the problem. There is no general rule in determining the number of neurons in the hidden layer. If the number of neurons in the hidden layer is chosen too small, the classification success will be low. Using a large number of neurons in the hidden layer can result in longer training time and overfitting. Accordingly, in order to designate the optimal number of neurons in the hidden layer, the dimensions of the input and output layers should be chosen by considering them. After some trials, the feasible artificial neuron numbers in the hidden layer were chosen as 20. We utilized the log-sigmoid transfer function as it is suitable and preferred for small networks.

SVM is a well-known supervised method that creates a hyperplane between different datasets and classifies two classes of data. SVM moves the problem to a higher dimensional space using a suitable kernel function, and it solves complex and multidimensional problems [56]. K-NN non-parametric supervised learning method which is used mostly for classification and regression. The output of k-NN is a class membership where the class label of a new sample is attained by the class label of its k nearest neighbors [57]. The Euclidean distance is the most commonly used metric.

2.4.3 Classification evaluation criteria

The toolboxes in Matlab R2021a software were used for ANN, SVM, and k-NN applications in this study. Accuracy, precision, sensitivity, and specificity were chosen as performance metrics [58].

All the calculations are performed with MATLAB R2021a, on a PC with a 2.4-GHz CPU and 16 GB RAM. The average computation time is around 2 s to analyze the

samples in 4 or 3 classes, showing that the recommended method is computationally capable.

3 Results and discussion

3.1 Case 1: CWRU dataset

Vibration data obtained from four different bearing sets HB, FB1, FB2, and FB3 were preprocessed and the feature sets were formed. The duration of each measurement is 4.16 s, and the sampling frequency is 48000 samples/s. The signal length is 200000 samples for each bearing. In Figure 9, time-domain vibration signals are given. The vibration amplitudes of the HB bearing are lower than the other bearings. The highest amplitudes were observed in the FB1 bearing. Moreover, periodic sharp peaks are more frequent in FB1 and FB2 due to the faults.

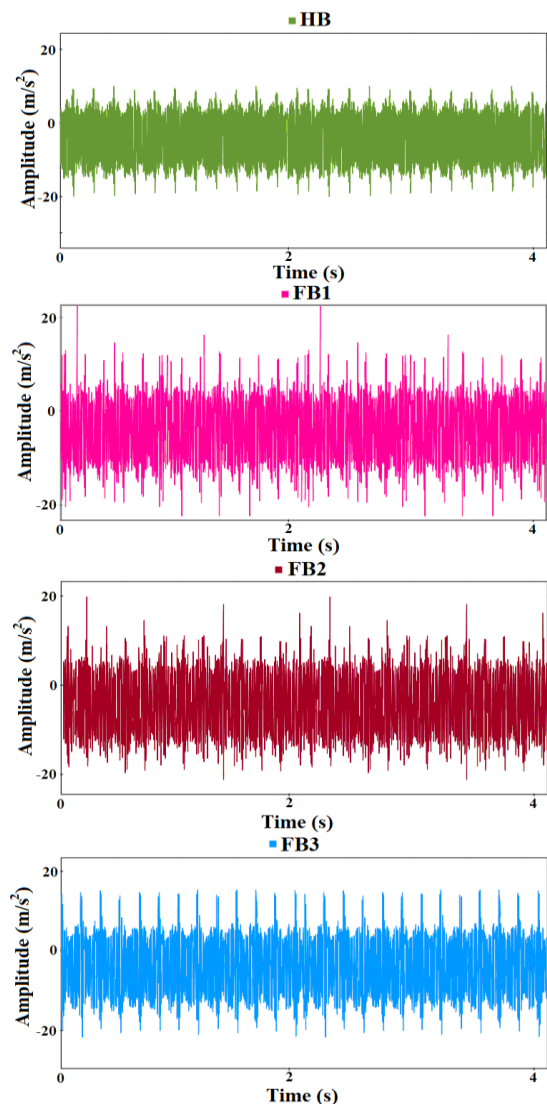


Figure 9. CWRU Raw vibration signals in the time domain

In Figure 10, frequency domain power spectrums of the bearing signals are given. Since the power spectrums seem similar, further spectral calculations are needed to comment on this situation.

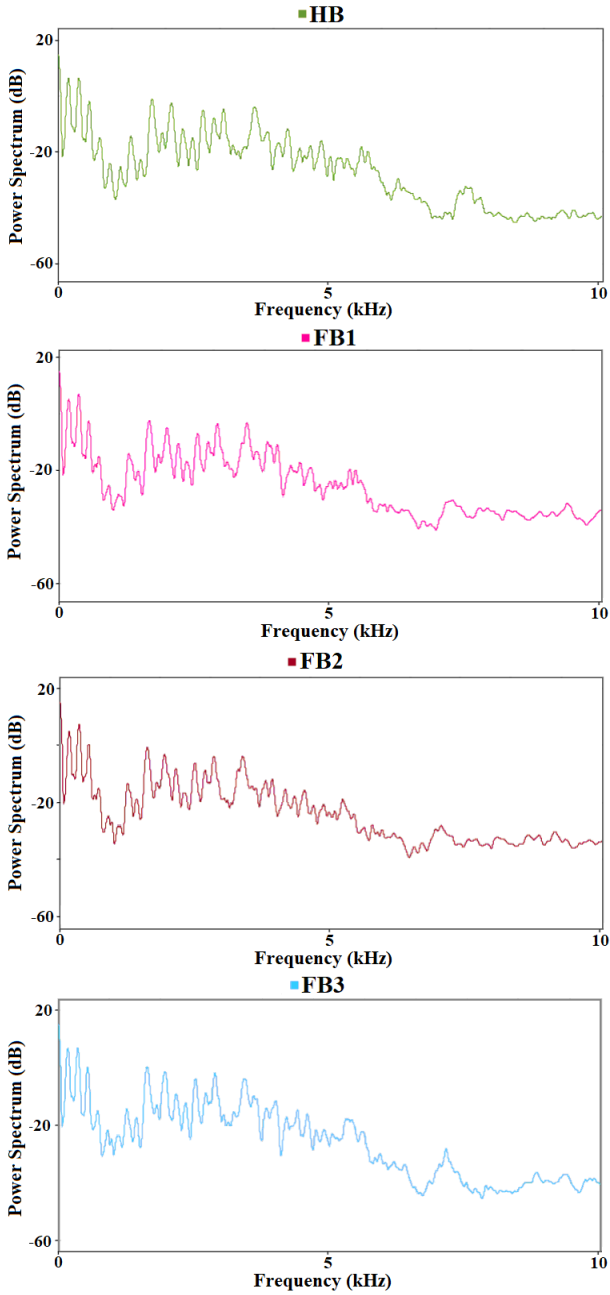


Figure 10. CWRU Power spectrum of the vibration signals

3.1.1 CSP-based Two-class ANN classification results

In Figure 11, the scatter matrices of CSP features for all defined bearing pairs are given. In Table 3 and Figure 12, performance comparisons of CSP-based binary ANNs are presented for healthy and faulty bearings. It can be observed from Table 3 that, the highest classification accuracy (88.5 %) is obtained for healthy bearing (HB) and bearing with outer race fault (FB1). Although the lowest accuracy (81.5%) was observed between bearing with outer race fault (FB1) and bearing with rolling element fault (FB3), it is notable that the value is considerably high. These results can also be inferred from the scatter plots of CSP features in Figure 11.

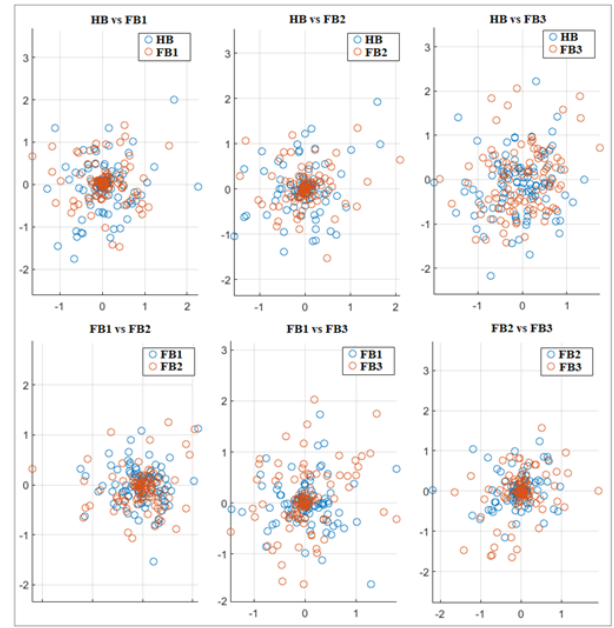


Figure 11. CSP feature visualization of CWRU Data

Table 3. CSP-based binary ANN accuracy results

Bearing Pairs	CSP-based Two-class Classification			
	Accuracy	Precision	Sensitivity	Specificity
HB vs FB1	0.885	0.920	0.859	0.913
HB vs FB2	0.880	0.960	0.828	0.952
HB vs FB3	0.835	0.910	0.791	0.894
FB1 vs FB2	0.835	0.770	0.885	0.796
FB1 vs FB3	0.815	0.800	0.825	0.806
FB2 vs FB3	0.820	0.710	0.910	0.762

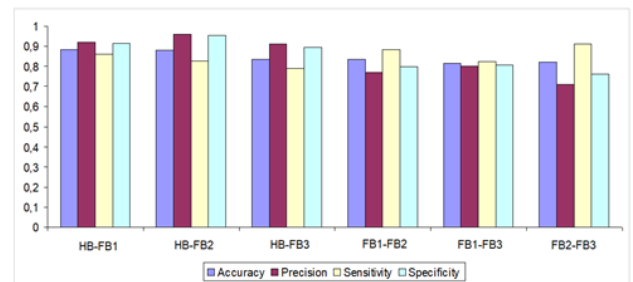


Figure 12. Bar graphs for accuracy metrics of ANN

3.1.2 Multiclass ANN classification with CSP

The performance for a single fault and all other faults are represented in this section respectively. In Figure 13, the scatter plots of four different cases are given. Table 4, and Figure 14 show performance metrics such as accuracy, precision, sensitivity, and specificity values of CSP-based multiclass ANN classifiers, for fault diagnosis in bearings. The results of multiclass classification for bearings are remarkably high enough and depicted as bold in tables. Therefore, we can conclude that the CSP values of HB and the rest have the highest distinctiveness (93.5 accuracy, 1 precision, 88.5% sensitivity, and 1 specificity).

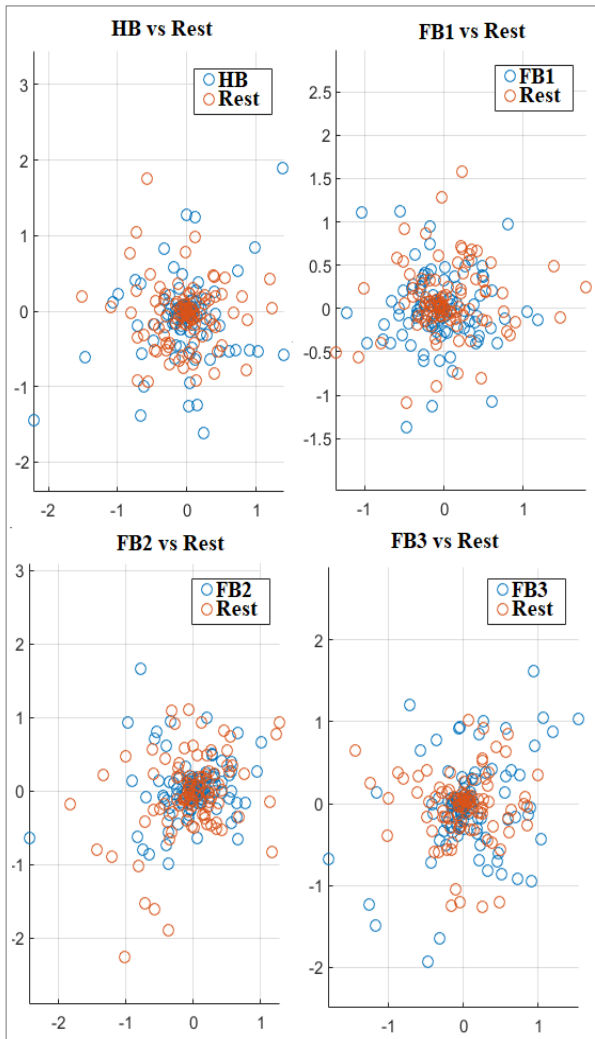


Figure 13. CSP feature visualization for all fault types

Table 4. Performance metrics for CSP-based ANN fault classification

Bearing Pairs	Accuracy	Precision	Sensitivity	Specificity
HB vs Rest	0.935	1	0.885	1
FB1 vs Rest	0.880	0.950	0.833	0.942
FB2 vs Rest	0.870	0.860	0.878	0.863
FB3 vs Rest	0.915	0.960	0.881	0.956

When the binary and multiple classification results are examined, it is seen that the classification accuracies are high enough to be declared. Moreover, bearing with rolling element fault (FB3) is considered the most difficult fault that can be diagnosed [51]. In general, the amplitudes of the frequency components of the ball passing from the outer and inner race are higher, while the amplitudes of frequency components of the ball spin are less. Therefore, the detection of the FB3 fault is also more difficult. However, in our study, 93.5 % accuracy for HB-FB3 and 91.5% for multiclass FB3 and Rest classification were obtained.

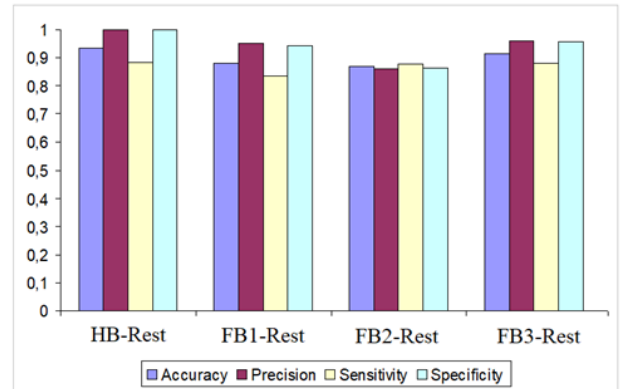


Figure 14. Bar graphs for accuracy metrics of CSP-based multiclass ANN

3.1.3 Classifier comparison between ANN -SVM - k-NN

In this part of the study, SVM and k-NN results for binary and multiclass classification are given comparatively to show the efficiency of similar classifiers that are usually preferred for vibration data fault detection. A standard type k-NN and a Gaussian kernel type SVM were tried. In Table 5 and Figure 15, all of the performance metrics are presented. From the tables, it is clear that ANN outperforms SVM and the k-NN (88.5% ANN, 66% SVM, and 50.5% k-NN). It is stated that k-NN performs well when the sample size is small; it is very simple and requires tuning only one hyperparameter (the value of k).

Table 5. Performances of different classifiers

	ANN	SVM	k-NN
HB vs FB1	0.885	0.660	0.505
HB vs FB2	0.880	0.685	0.520
HB vs FB3	0.835	0.755	0.505
FB1 vs FB2	0.835	0.615	0.520
FB1 vs FB3	0.815	0.650	0.505
FB2 vs FB3	0.820	0.655	0.510
HB vs Rest	0.935	0.795	0.785
FB1 vs Rest	0.880	0.825	0.755
FB2 vs Rest	0.870	0.805	0.575
FB3 vs Rest	0.915	0.810	0.835

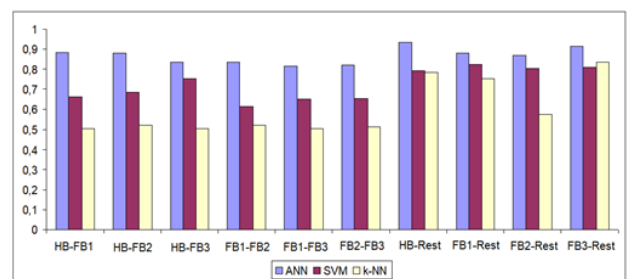


Figure 15. Bar graph comparisons for various classifiers

When the data size is larger, SVM and ANN are preferred. Although SVM is a powerful classification method, for this vibration data, we have obtained higher accuracies with ANN. There can be several possible explanations for this result; deep architectures can represent intelligent behavior more efficiently than shallow architectures like SVMs, in an ANN there are a bunch of hidden layers with fixed sizes depending on the number of

features. Parametric models represent them whereas SVMs are non-parametric [59].

3.1.4 Evaluation of CSP features versus Classical Statistical Features (CSF)

To demonstrate the effectiveness and distinctiveness of CSP features, we compared CSP results with generally used time domain statistical features (CSF) like standard deviation (SD), Root mean square (RMS), variance (VAR), kurtosis (K) and skewness (SK) [60]. These features were calculated and fed to the ANN classifiers. The results are shown in Table 6. From the table, it can be seen that using CSP features has achieved higher accuracies in all two-class and multiclass cases. Therefore, we can conclude that in condition monitoring of bearings, CSP features will be a possible tool in fault detection to improve diagnostic performance. In addition, CSP can reduce time and calculation energy loss due to complex and high-dimensional CSF calculations.

Table 6. Comparison of CSP and CSF features

	CSP-ANN	CSF-ANN
HB vs FB1	0.885	0.860
HB vs FB2	0.880	0.820
HB vs FB3	0.835	0.830
FB1 vs FB2	0.835	0.830
FB1 vs FB3	0.815	0.800
FB2 vs FB3	0.820	0.800
HB vs Rest	0.935	0.900
FB1 vs Rest	0.880	0.850
FB2 vs Rest	0.870	0.860
FB3 vs Rest	0.915	0.900

3.2 Case 2: The University of Ferrara dataset signal analysis

Time domain vibration signals and frequency domain power spectrums of the four different bearing sets FB1-2, FB2-2, and FB3-2 are given in Figure 16.

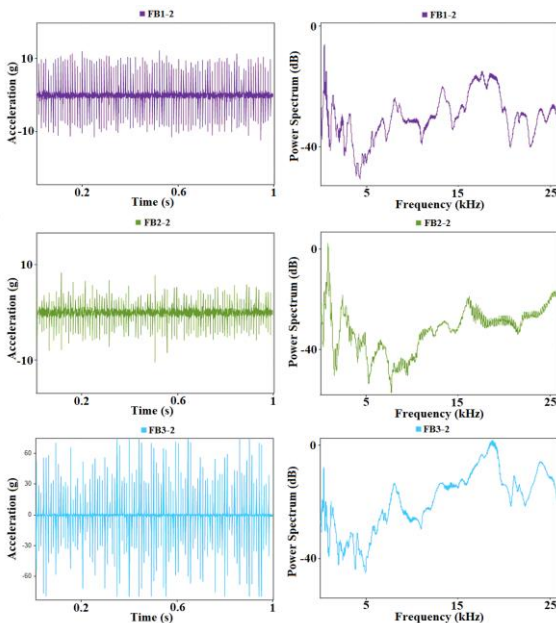


Figure 16. The vibration signals in the time and frequency domain

3.2.1 CSP-based Two-class ANN classification for the second dataset

In Figure 17, the scatter matrices of CSP features for the second dataset are given. In Table 7 performance comparisons of CSP-based binary ANNs are given for faulty bearings.

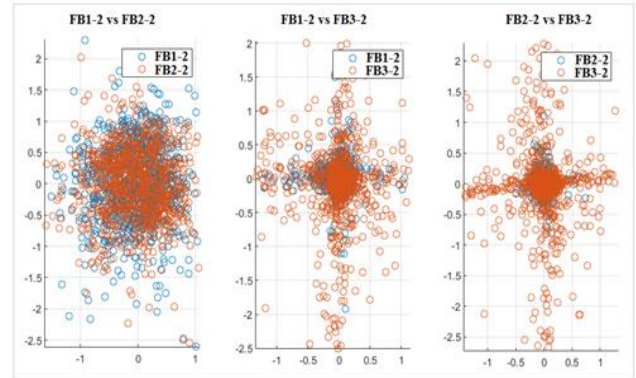


Figure 17. CSP projections of acceleration data for two-class ANN for the second dataset

Table 7. CSP-based binary ANN accuracy results

CSP-based Two-class Classification				
Bearing Pairs	Accuracy	Precision	Sensitivity	Specificity
FB1-2 vs FB2-2	0.750	0.800	0.714	0.800
FB1-2 vs FB3-2	0.833	0.667	1	0.750
FB2-2 vs FB3-2	0.917	0.833	1	0.857

3.2.2 The University of Ferrara multiclass ANN classification with CSP

The performance for a single fault and all other faults are represented in this section respectively. In Figure 18, the scatter plots of 3 different cases are given. Table 8, shows performance metrics such as accuracy, precision, sensitivity, and specificity values of CSP-based multiclass ANN classifiers, for the second dataset.

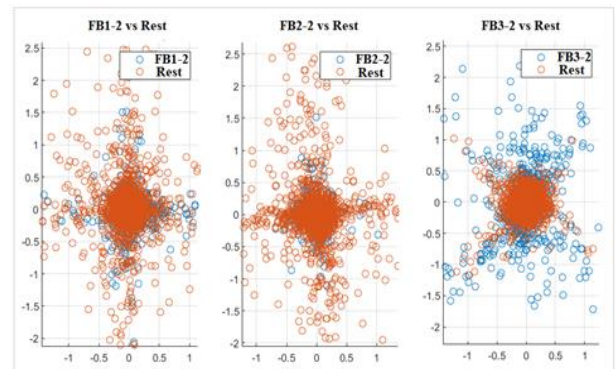


Figure 18. CSP features separation for all fault types

Table 8. Performance metrics for CSP-based ANN fault classification for the second dataset

Bearing Pairs	Accuracy	Precision	Sensitivity	Specificity
FB1-2 vs Rest	0.917	0.833	1	0.857
FB2-2 vs Rest	0.833	0.667	1	0.750
FB3-2 vs Rest	0.917	1	0.857	1

3.2.3 Classifier comparison between ANN -SVM - k-NN

In this part of the study, SVM and k-NN results for binary and multiclass classification are given for the second dataset. In Table 9 all of the performance metrics are presented.

Table 9. Performances of different classifiers

	ANN	SVM	k-NN
FB1-2 vs FB2-2	0.750	0.833	0.510
FB1-2 vs FB3-2	0.833	0.917	0.667
FB2-2 vs FB3-2	0.917	0.917	0.583
FB1-2 vs Rest	0.917	0.833	0.583
FB2-2 vs Rest	0.833	0.917	0.510
FB3-2 vs Rest	0.917	0.750	0.417

3.2.4 Evaluation of CSP features versus Classical Statistical Features (CSF) for the second dataset

The results can be seen in Table 10. From the table, it is quite apparent that using CSP features has achieved higher accuracies in all two-class and multiclass cases for the second dataset.

Table 10. Comparison of CSP and CSF features

	CSP-ANN	CSF-ANN
FB1 vs FB2	0.750	0.710
FB1 vs FB3	0.833	0.750
FB2 vs FB3	0.917	0.850
FB1 vs Rest	0.917	0.850
FB2 vs Rest	0.833	0.800
FB3 vs Rest	0.917	0.850

3.3 Comparison of CSP-based ANN performance with the existing literature

CWRU bearing diagnostic vibration data [36] were commonly used in the literature as it's a benchmark dataset. In this part of the study, we have compared our results with the existing literature that they have used a similar structure to our dataset. Although many studies have used CWRU data, the selected working datasets and the methodologies differ in concept. Therefore, it is difficult to make a logical comparison between these studies. In the study by Sun, J. et al. [61], they proposed a novel method for bearing fault detection, coming from the idea of compressed sensing and deep learning. Table 11 compares the average accuracy

results obtained with the methods used in this study with the results of [62,63].

Table 11. Comparison of the results with the existing literature

Method	Average Accuracy
CSP-based SVM (CRWU)	0.72
CSP-based k-NN (CRWU)	0.60
CSP-based ANN(CRWU)	0.88
CSF-based ANN(CRWU)	0.85
CSP-based SVM (The University of Ferrara)	0.86
CSP-based k-NN (The University of Ferrara)	0.55
CSP-based ANN (The University of Ferrara)	0.86
CSF-based ANN (The University of Ferrara)	0.80
Compression sampling-based Deep Neural Networks [61]	0.97
Raw time domain signal-based Deep Neural Networks [62]	0.96
GoogleNet-CNN [63]	1
ResNet-50-CNN [63]	1
AlexNet-CNN [63]	0.9
EfficientNet-B0-CNN [63]	1

The average accuracy obtained from the studies in [61-63] is higher than the accuracy rates obtained from the CSP-based diagnostics proposed in this study. However, considering the computational complexity and the applicability of the deep learning approach, CSP-based diagnostics can still yield satisfactory results for simplicity and rapid diagnosis.

4 Conclusions

A novel fault diagnosis method for rolling bearing via the CSP algorithm is recommended in this study. CSP maximizes the variance ratio of the two-class signal matrices coming from different sources. The case study is validated with two known data sets. It is proven with the calculations that the use of CSP features is both powerful and advantageous to identify different faults in terms of computational load. An 88.5% accuracy was obtained with ANN for two-class fault detection and 93.5% for fault classification. The results of the study were tested with SVM and k-NN, and it is seen that ANN has the highest accuracy performance. Moreover, classical time domain feature set results were also presented comparatively. CSP features have achieved higher accuracies in all two-class and multiclass cases. The proposed feature extraction method does not use the typical frequency or time domain features; instead, it focuses on capturing the covariance nature of impact vibrations. The CSP-based approach can overcome the confusion created by the nonlinearity and the inadequacy of classical methods such as statistical features and envelope analysis. We can propose CSP features to be used for condition monitoring of bearings with acceleration data. Based on the findings of this study, further research could explore the application of the CSP algorithm to a wider range of machinery and mechanical systems beyond rolling bearings, in order to determine its effectiveness in fault diagnosis across various industrial contexts.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %10

References

- [1] J. Chen, C. Lin, D. Peng and H. Ge, Fault diagnosis of rotating machinery: A review and bibliometric analysis. *Ieee Access*, 8, 224985-225003, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043743>
- [2] O. AlShorman, M. Irfan, N. Saad, D. Zhen, N. Haider, A. Glowacz and A. AlShorman, A review of artificial intelligence methods for condition monitoring and fault diagnosis of rolling element bearings for induction motor. *Shock and vibration*, ID 8843759, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8843759>
- [3] P. Bangalore and L.B. Tjernberg, An artificial neural network approach for early fault detection of gearbox bearings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 980-987, 2015. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2386305>
- [4] P. Gupta and M.K. Pradhan, Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2085-2094, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.054>
- [5] R. Yao, H. Jiang, Z. Wu and K. Wang, Periodicity-enhanced sparse representation for rolling bearing incipient fault detection. *ISA transactions*, 118, 219-237, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.02.023>
- [6] S. Lu, P. Zhou, X. Wang, Y. Liu, F. Liu and J. Zhao, Condition monitoring and fault diagnosis of motor bearings using undersampled vibration signals from a wireless sensor network. *Journal of Sound and Vibration*, 414, 81-96, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.11.007>
- [7] J. Wang, M. Xu, C. Zhang, B. Huang and F. Gu, Online bearing clearance monitoring based on an accurate vibration analysis. *Energies*, 13(2), 389, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13020389>
- [8] H.O. Omoregbee and P.S. Heyns, Fault classification of low-speed bearings based on support vector machine for regression and genetic algorithms using acoustic emission. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 7, 455-464, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42417-019-00143-y>
- [9] B.R.F. Rende, A.A. Cavalini Jr and I.F. Santos, Fault detection using vibration data-driven models—a simple and well-controlled experimental example. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(6), 229, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03462-6>
- [10] H. Wang and P. Chen, A feature extraction method based on information theory for fault diagnosis of reciprocating machinery. *Sensors*, 9(4), 2415-2436, 2009. <https://doi.org/10.3390/s90402415>
- [11] C. Malla and I. Panigrahi, Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 7, 407-414, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42417-019-00119-y>
- [12] S.K. Gundewar and P.V. Kane, Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9, 643-674, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00253-y>
- [13] Q. He, Y. Liu, Q. Long and J. Wang, Time-frequency manifold as a signature for machine health diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(5), 1218-1230, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2183402>
- [14] H. Cao, F. Fan, K. Zhou and Z. He, Wheel-bearing fault diagnosis of trains using empirical wavelet transform. *Measurement*, 82, 439-449, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.023>
- [15] Y. Gao, D. Yu and H. Wang, Fault diagnosis of rolling bearings using weighted horizontal visibility graph and graph Fourier transform. *Measurement*, 149, 107036, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107036>
- [16] D. Zhao, W. Cheng, R.X. Gao, R. Yan and P. Wang, Generalized Vold–Kalman filtering for nonstationary compound faults feature extraction of bearing and gear. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(2), 401-410, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2903700>
- [17] B. Muruganatham, M.A. Sanjith, B. Krishnakumar and S.S. Murty, Roller element bearing fault diagnosis using singular spectrum analysis. *Mechanical systems and signal processing*, 35(1-2), 150-166, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.08.019>
- [18] J.B. Ali, N. Fnaiech, L. Saidi, B. Chebel-Morello and F. Fnaiech, Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals. *Applied Acoustics*, 89, 16-27, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.08.016>
- [19] Y. Li, Q. Gao, B. Miao, W. Zhang, J. Liu and Y. Zhu, Application of the refined multiscale permutation entropy method to fault detection of rolling bearing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(5), 280, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02986-7>
- [20] Y. Cheng, S. Wang, B. Chen, G. Mei, W. Zhang, H. Peng and G. Tian, An improved envelope spectrum via candidate fault frequency optimization-gram for bearing fault diagnosis. *Journal of Sound and Vibration*, 523, 116746, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116746>
- [21] Y. Wang and M. Liang, Identification of multiple transient faults based on the adaptive spectral kurtosis method. *Journal of Sound and Vibration*, 331(2), 470-486, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.08.029>
- [22] J.K. Alsalaet, Fast averaged cyclic periodogram method to compute spectral correlation and coherence. *ISA transactions*, 129, 609-630, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.01.029>
- [23] Z. Feng, H. Ma and M.J. Zuo, Spectral negentropy based sidebands and demodulation analysis for planet bearing fault diagnosis. *Journal of Sound and*

- Vibration, 410, 124-150, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.08.024>
- [24] D. Wang, X. Zhao, L.L. Kou, Y. Qin, Y. Zhao and K.L. Tsui, A simple and fast guideline for generating enhanced/squared envelope spectra from spectral coherence for bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 122, 754-768, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.12.055>
- [25] B. Tang, W. Liu and T. Song, Wind turbine fault diagnosis based on Morlet wavelet transformation and Wigner-Ville distribution. *Renewable Energy*, 35(12), 2862-2866, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.05.012>
- [26] W. Sun, G. An Yang, Q. Chen, A. Palazoglu and K. Feng, Fault diagnosis of rolling bearing based on wavelet transform and envelope spectrum correlation. *Journal of Vibration and Control*, 19(6), 924-941, 2013.
<https://doi.org/10.1177/1077546311435348>
- [27] F. Zou, H. Zhang, S. Sang, X. Li, W. He and X. Liu, Bearing fault diagnosis based on combined multi-scale weighted entropy morphological filtering and bi-LSTM. *Applied Intelligence*, 1-18, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s10489-021-02229-1>
- [28] Z. Feng, D. Zhang and M. J. Zuo, Adaptive mode decomposition methods and their applications in signal analysis for machinery fault diagnosis: a review with examples. *IEEE access*, 5, 24301-24331, 2017.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766232>
- [29] W. Ying, J. Tong, Z. Dong, H. Pan, Q. Liu and J. Zheng, Composite multivariate multi-Scale permutation entropy and laplacian score based fault diagnosis of rolling bearing. *Entropy*, 24(2), 160, 2022.
<https://doi.org/10.3390/e24020160>
- [30] J. Altmann and J. Mathew, Multiple band-pass autoregressive demodulation for rolling-element bearing fault diagnosis. *Mechanical systems and signal processing*, 15(5), 963-977, 2001.
<https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1410>
- [31] C. Xu, C. Wang and Liu, Nonstationary vibration signal analysis using Wavelet-based time-frequency filter and wigner-ville distribution. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(5), 051009, 2016.
<https://doi.org/10.1115/1.4033641>
- [32] H. Ramoser, J. Muller-Gerking, and G. Pfurtscheller, Optimal spatial filtering of single trial EEG during imagined hand movement. *IEEE transactions on rehabilitation engineering*, 8(4), 441-446, 2000.
<https://doi.org/10.1109/86.895946>
- [33] I. Xygonakis, A. Athanasiou, N. Pandria, D. Kugiumtzis and P.D. Bamidis, Decoding motor imagery through common spatial pattern filters at the EEG source space. *Computational intelligence and neuroscience*, ID 7957408, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/7957408>
- [34] Y.E. Karabacak and N.G. Özmen, Common spatial pattern-based feature extraction and worm gear fault detection through vibration and acoustic measurements. *Measurement*, 187, 110366, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110366>
- [35] Z. Li, Y. Lv, R. Yuan and Q. Zhang, An intelligent fault diagnosis method of rolling bearings via variational mode decomposition and common spatial pattern-based feature extraction. *IEEE Sensors Journal*, 22(15), 15169-15177, 2022.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9807645>
- [36] Case Western Reserve University Bearing Data Center Website. <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter>, Accessed 14.7.2023
- [37] R.B. Randall, *Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. John Wiley & Sons, NJ, 2021.
- [38] A. Gabrielli, M. Battarra, E. Mucchi and G. Dalpiaz, Acceleration signals of rolling element bearings with artificial defects. *Mendeley Data*, 2022.
<https://doi.org/10.17632/8wdzm5gwng.1>
- [39] P. Kumar and A.S. Hati, Review on machine learning algorithm based fault detection in induction motors. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 1929-1940, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09446-w>
- [40] T. Han, D. Jiang, Q. Zhao, L. Wang and K. Yin, Comparison of random forest, artificial neural networks and support vector machine for intelligent diagnosis of rotating machinery. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(8), 2681-2693, 2018.
<https://doi.org/10.1177/0142331217708242>
- [41] L.B. Jack and A.K. Nandi, Fault detection using support vector machines and artificial neural networks, augmented by genetic algorithms. *Mechanical systems and signal processing*, 16(2-3), 373-390, 2002.
<https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1454>
- [42] S. Liu, J. Xie, C. Shen, X. Shang, D. Wang and Zhu, Z, Bearing fault diagnosis based on improved convolutional deep belief network. *Applied Sciences*, 10(18), 6359, 2020.
<https://doi.org/10.3390/app10186359>
- [43] R. Liu, B. Yang, E. Zio and X. Chen, Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108, 33-47, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.02.016>
- [44] H. Zhao, X. Yang, B. Chen, H. Chen and W. Deng, Bearing fault diagnosis using transfer learning and optimized deep belief network. *Measurement Science and Technology*, 33(6), 065009, 2022.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac543a>
- [45] Y. Kaya, M. Kuncan, K. Kaplan, M.R. Minaz and H.M. Ertunç, A new feature extraction approach based on one dimensional gray level co-occurrence matrices for bearing fault classification. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 33(1), 161-178, 2021.
<https://doi.org/10.1080/0952813X.2020.1735530>
- [46] S. Bayram, K. Kaplan, M. Kuncan and H. M. Ertunç, The effect of bearings faults to coefficients obtained by using wavelet transform. *22nd Signal Processing and*

- Communications Applications Conference (SIU), pp. 991-994, Trabzon, Turkey, 23-25 April 2014.
- [47] Y. Kaya, F. Kuncan and H.M. Ertunç, A new automatic bearing fault size diagnosis using time-frequency images of CWT and deep transfer learning methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(5), 1851-1867, (2022). <https://doi.org/10.55730/1300-0632.3909>
- [48] M. Kuncan, An Intelligent Approach for Bearing Fault Diagnosis: Combination of 1D-LBP and GRA. *IEEE Access*, 8, 137517-137529, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3011980>.
- [49] H. Yang, X. Li and W. Zhang, Interpretability of deep convolutional neural networks on rolling bearing fault diagnosis. *Measurement Science and Technology*, 33(5), 055005, 2022. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac41a5>
- [50] N.M. Thoppil, V. Vasu and C.S.P. Rao, Deep learning algorithms for machinery health prognostics using time-series data: A review. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-23, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00286-x>
- [51] W.A. Smith and R.B. Randall, Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study. *Mechanical systems and signal processing*, 64, 100-131, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.021>
- [52] H. Nguyen-Schäfer, *Computational design of rolling bearings*. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [53] T. Nguyen, I. Hettiarachchi, A. Khatami, L. Gordon-Brown, C.P. Lim and S. Nahavandi, Classification of multi-class BCI data by common spatial pattern and fuzzy system. *IEEE access*, 6, 27873-27884, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841051>
- [54] V. Martínez-Cagigal, Common Spatial Patterns (CSP), MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72204-common-spatial-patterns-csp>, Accessed 14.07.2023.
- [55] Y.E. Karabacak, N.G. Özmen and L. Gümüşel, Intelligent worm gearbox fault diagnosis under various working conditions using vibration, sound and thermal features. *Applied Acoustics*, 186, 108463, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108463>
- [56] D.J. Bordoloi and R. Tiwari, Optimum multi-fault classification of gears with integration of evolutionary and SVM algorithms. *Mechanism and Machine Theory*, 73, 49-60, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.10.006>
- [57] Q. Wang, S. Wang, B. Wei, W. Chen and Y. Zhang, Weighted K-NN classification method of bearings fault diagnosis with multi-dimensional sensitive features. *IEEE Access*, 9, 45428-45440, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066489>
- [58] A.A.A. Mohd Amiruddin, H. Zabiri, S.A.A. Taqvi and L.D. Tufa, Neural network applications in fault diagnosis and detection: an overview of implementations in engineering-related systems. *Neural Computing and Applications*, 32, 447-472, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3911-5>
- [59] Y. Bengio and Y. LeCun, Scaling Learning Algorithms towards AI. in: L. Bottou, O. Chapelle, D. DeCoste, J. Weston (Eds.), *Large-Scale Kernel Machines*, MIT Press, NY, 2007.
- [60] Z. Xia, S. Xia, L. Wan and S. Cai, Spectral regression based fault feature extraction for bearing accelerometer sensor signals. *Sensors*, 12(10), 13694-13719, 2012. <https://doi.org/10.3390/s121013694>
- [61] J. Sun, C. Yan and J. Wen, Intelligent bearing fault diagnosis method combining compressed data acquisition and deep learning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(1), 185-195 2017. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2759418>
- [62] M. Sun, Z. Song, X. Jiang, J. Pan and Y. Pang, Learning pooling for convolutional neural network. *Neurocomputing*, 224, 96-104, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.10.049>
- [63] Y.E. Karabacak and N. Gürsel Özmen, Application of Deep Learning Method for Condition Monitoring and Fault Diagnosis from Vibration Data in Bearings. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 346-365, 2022. <https://doi.org/10.36306/konjes.1049489>





Kızılötesi kurutmada hurma (*Phoenix dactylifera* L.) pestilinin efektif difüzyon katsayısının belirlenmesi: Pişme süresinin etkisi

Effective diffusivity determination of date (*Phoenix dactylifera* L.) leather in infrared drying: Effect of cooking time

Suzan Tireki^{1,*} 

¹ Ozyegin University, Gastronomy and Culinary Arts Department, 34794, İstanbul Türkiye

Öz

Geleneksel kurutma yöntemlerinde gerçekleşen uzun işlem süreleri hızlı teknolojiler kullanılarak iyileştirilebilmektedir. Kızılötesi kurutma bu hızlı yöntemlerden biridir. Sağlık ve zindelik ürünlerine ilişkin tüketici bilinci yükselmiş ve Covid-19 pandemisi ile de güçlenmiştir. Bu nedenle, doğal içeriklerle formüle edilmiş atıştırılabilir ürünlerin tüketim eğilimi artmıştır. Bu eğilimin artarak devam edeceği öngörülmektedir. Bu konudan hareketle; bu çalışmada hurma ile pestil üretimi kızılötesi kurutma ile yapılmış ve pişirme süresinin kuruma davranışına etkisi incelenmiştir. Öncelikle hurmalar yıkanıp, çekirdekleri çıkarıldıktan sonra 1:2,5 (hurma:su) oranında su ilave edilerek 30, 45 ve 60 dakika pişirilmiştir. Daha sonra, numuneler preslenmiş ve 10 mm kalınlığında kurutulmuştur. Kuruma eğrileri birinci dereceden kuruma kinetiği göstermiş ve meyve pestillerinin efektif difüzyon katsayıları (D_{eff}) 30, 45 ve 60 dakikalık pişirme süreleri için sırasıyla $1,53 \times 10^{-9}$, $1,70 \times 10^{-9}$ ve $1,74 \times 10^{-9}$ m²/s olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Pişme süresi, Hurma, Efektif nem difüzyon katsayısı, Pestil, Kızılötesi kurutma

Abstract

Longer process times in conventional drying methods can be improved by using rapid technologies. Infrared drying is one of these faster methods. Consumer awareness on health and wellness products has increased and boosted with Covid-19 pandemic. Therefore, the consumption trend of snack products formulated with natural ingredients has increased. It is estimated that this trend will continue to rise. In accordance with this, fruit leather production from dates was done by infrared drying and the effect of cooking time on drying behavior was investigated. Firstly, dates were washed and seeds were removed, then water was added at a ratio of 1:2.5 (dates:water), and cooked for 30, 45 and 60 min. Samples were pressed and dried at 10 mm thickness. Drying curves showed first-order drying kinetics and effective moisture diffusivity (D_{eff}) of fruit leathers were found as 1.53×10^{-9} , 1.70×10^{-9} and 1.74×10^{-9} m²/s for 30, 45 and 60 min of cooking time, respectively.

Keywords: Cooking time, Dates, Effective moisture diffusivity, Fruit leather, Infrared drying

1 Introduction

One of the earliest trees that humans have cultivated is the date palm [1]. Dates are marketed as high-value fruit crops and are mostly grown in the desert areas of Southwest Asia and North Africa [2]. The fruit represents a food security crop in these regions providing value for nutrition for the last 5000 years [3]. Date is a very popular fruit for its tasty sweetness, nutritional, and medicinal properties [4] and can be consumed in fresh or dried form. Dates production volume increased from 8.40 million metric tons in 2017 to 9.66 million metric tons in 2021, it is ranked as second after dried grapes in the global dried fruit production, and the global market value of the date palm industry is expected to be 16.11, 17.07, and 19.76 million U.S. dollars for 2024, 2025, and 2026 [5]. Date has a vital role in economic production not only with the fruit but also with the by-products such as pasta, flour, syrup, vinegar, yeast, and confectionery [6].

Date (palm *Phoenix dactylifera* L.) fruit is in the family of *Arecaceae* (or *palmae*) [3]. Although commercial cultivars are few, there are more than 5000 date palm

cultivars globally that vary in terms of their genetic, morphological, and nutritional characteristics [7]. The fruit is made up of a seed and fleshy pericarp which constitutes 85-90% of the weight of a date fruit [8]. Typical weight per fruit ranges between 2 and 60 g, and length and width can vary from 18 to 110 and 8 to 32 mm, respectively [2]. Sugars including sucrose, fructose, and glucose, which make up two-thirds of date flesh, are found naturally in dates [9]. Fresh dates contain about 4.03 g sucrose, 19.4 g fructose, and 22.8 g glucose in 100 g; whereas average sucrose, fructose, and glucose quantities in dried dates are 11.6 g, 29.4 g, and 30.4 g per 100 g, respectively [2]. Besides its carbohydrates (80-90%), date fruit is also an excellent source of dietary fiber (6.4-11.5%), protein (2.3-5.6%), minerals (0.10-916 mg/ 100 g dry weight), and vitamins (3900 µg Vitamin C, 78.67 µg Vitamin B₁, 116.5 µg Vitamin B₂, 1442 µg of Vitamin B₃, and 28.85 µg Vitamin A per 100 g) [2, 4]. The amount of quantities of these macro- and micro-nutrients depend on the cultivar type and maturity stage [7]. There are 23 different amino acid types in date proteins, and glutamic acid, aspartic acid, histidine, proline, cystine, lysine,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: suzan.tireki@ozyegin.edu.tr (S. Tireki)

Geliş / Received: 23.07.2023 Kabul / Accepted: 14.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1331515

tyrosine, phenylalanine, arginine, valine, leucine, isoleucine, glycine, threonine, methionine, alanine, and serine are among the amino acids found in the majority of date cultivars, some of these amino acids are not present in popular fruits like bananas, apples, and oranges [9]. Magnesium, copper, selenium, and potassium are among the top ten reported minerals for dates and fruit is a good source of antioxidants, especially phenolics and carotenoids [2]. Varying degrees of antioxidant and antimutagenic activity can be attributed to phenolics and carotenoids (anthocyanins and flavonoids) [9] and total phenolics found in dates have more antioxidant activity with respect to ascorbic acid [10]. Moreover, the date palm has other beneficial properties like antifungal, antiviral, neuroprotective, and hepatoprotective and antihyperlipidemic activity [11]. Due to these mentioned nutritional components and benefits, dates can be regarded as a good example of functional food [2] and can play an important role in nutrition and health. Therefore, the development of food products formulated with dates is essential.

Dates should be dried for safe storage since they are prone to microbial deterioration due to their high moisture content at the time of harvest and drying is one of the earliest methods for food preservation to increase the shelf life [4]. Fruit leather (also known as fruit bar, or fruit slab) is a dried fruit-based confectionery dietary product that is frequently consumed as a snack or dessert [12]. The name for "fruit leather" comes from its chewy and soft texture and the product is a historic method to preserve fruits [13]. Drying has been reported as a fruit preservation technique as early as 1700 BCE and at that time whole and macerated fruits like figs, dates, and apricots were sun-dried till a chewy and leather-like texture was attained [14]. The benefits of fruit leathers include highly dense nutritional value, ease of storage, and potential for value addition, which make them healthy substitutes for snack products [15]. Any type of fruit can be used for fruit leather, the product is made by pureeing the fruits (with or without the addition of other ingredients) and then allowing them to dry sufficiently and then fruit leather is cut into strips, rolled up, and stored for future use [12, 13]. The production process of fruit leather may change due to the fruit type, the nature of other recipe ingredients, and the drying method [12]. Commercial fruit leather production has taken many forms over the years from rolled-up leathers from small vendors to formed fruit snacks, chips, and chews from large-scale producers [13].

Open sun drying is the most simple and traditional method since it is cheap and convenient, however, it leads to low-quality products due to the risk of insect infestation and foreign material contamination [4]. In addition, it depends on weather conditions and requires manual operations [12]. The drying time of fruit leathers has been reported to be 1-2 days when conventional open sun drying is conducted [16]. Hence, alternative drying techniques were developed to overcome these advantages of hygiene and time and they provide safe, fast, and controllable processes [17]. Besides traditional sun drying, tunnel and forced air circulation dryers have been used in the production of fruit leathers and convective dryer with hot air/direct combustion gases

constitutes more than 85% of the industrial dryers [12]. Using the wrong drying method causes irreversible damage to the final product's quality in many processes [18]. Fruit leather can be produced at a high quality with modern drying systems including direct, indirect, infrared, and microwave dryers.

Infrared radiation is the part of the sun's electromagnetic spectrum, which is predominantly responsible for the heating effect of the sun. Infrared radiation can be divided into near-infrared radiation, mid-infrared radiation and far-infrared radiation and lies in the wavelength range between 0.78 and 1000 μm [19]. Radiation impinges the material, penetrates it and the radiation energy is converted into heat when radiation is selected as the heating method for moist materials [20]. As a material is heated intensely, the temperature difference in the material reduces in a short time. Hence, the consumption of energy in infrared heating is lesser. Without heating the surrounding air, infrared energy is transferred from the heating element to the surface of the material [21]. Short heating times, rapid processing, reduced chance of flavor loss, preservation of vitamins in food products, equipment compactness and solute migration absence from inner to outer regions are some of the benefits of infrared radiation with respect to conventional heating methods [22]. Infrared heating is particularly very suitable for the drying of thin layer materials with large surfaces exposed to radiation [23], therefore it is very appropriate to dry fruit leather products. Application of infrared drying methods to dry fruits and vegetables such as apple, quince, grapefruit, lemon, persimmon, banana, peach, mushroom, carrot, pumpkin, garlic, and onion are rather common [23], but studies regarding infrared drying of nutritive and functional dates and fruit leather made from dates is very limited. In a study, heat and mass transfer were investigated for the combined convective and far-infrared drying of longan leather [24]. Shorter drying times of 520, 440, and 400 min were seen for combined convective and far infrared drying at 1.90, 3.03, and 4.20 kW/m^2 heat flux, respectively, whereas it took 750 min in hot air drying at 70°C [24]. Peach leather was produced with different drying methods including infrared drying and it was seen that 210 min of infrared drying resulted in the best color, flavor, and appearance when compared to 300 min of hot air, 210 min of hot air-assisted radio frequency and 180 min of microwave-assisted hot air drying [25]. In another study, rosehip leather was prepared with hot air and infrared drying, and it was observed that infrared drying had 25% shorter drying times with respect to hot air drying at 60°C [26]. Banana leather was also investigated with far infrared assisted refractance window drying and it was seen that 46 min of hot air drying time was reduced by far infrared assisted refractance window to 14 and 12 min at infrared parameters of 50°C and 60°C, respectively [27].

Consumer awareness on health and wellness food products has been increased and boosted with Covid-19 pandemic. Hence, the consumption trend of sweet snack products formulated with natural ingredients such as fruits and vegetables, with no/reduced added sugar and flour and that are convenient to prepare has increased considerably. It

is estimated that this trend will continue to rise. Fruit leathers provide important macro- and micro-nutrients, and they are affordable and practical alternatives for eating fruit that does not need to be refrigerated while being transported and stored [28]. Dates leather can be a healthy and convenient option for consumers with key nutritional components like dietary fibers, minerals, vitamins, and antioxidants as mentioned previously. The drying process is one of the most important factors affecting the quality of the final product [29]. The cooking stage is one of the important steps in manufacturing affecting both quality and energy consumption (hence cost) of the final product. Therefore, in this study, it was aimed to produce dates leather with no added sugar and/or flour by infrared drying and to investigate the effect of cooking time on drying behavior. Scarcity of the studies regarding infrared dried fruit leathers might be due to the high cost of infrared dryers. In this study, a moisture analyzer with an infrared drying mechanism was employed for infrared drying. Hence, another aim of the study was to determine the suitability of the instrument for small-batch fruit leather drying trials in an economical, sustainable, and modern way.

2 Material and methods

2.1 Materials

Dried dates with 75 g carbohydrates, 1.8 g proteins, 6.7 g dietary fiber, 0.2 g fat, and 22.98% moisture content were supplied from a local market in İstanbul, Türkiye. Bottled water with 7.34 pH, 32.2 mg/L calcium, 4.2 mg/L magnesium, 0.2 mg/L potassium, and 5.4 mg/L sodium was obtained from a local market in İstanbul, Türkiye and used in the experiments.

2.2 Preparation of fruit leather

Figure 1 demonstrates the preparation steps of fruit leather from dates. First of all, the seeds of the dried dates were removed with the use of knife and bottled water was added to the dates at 1:2.5 (dates:water) ratio. The sample was cooked in a pot for 30 min or 45 min or 60 min with electric heating (Kumtel KH/LX 7010, Kayseri, Türkiye). Then, the sample was pressed with a blender (Moulinex, DDF4 Optipro, Cedex, France) to obtain a homogeneous marmalade. Marmalade was transferred into a weighted petri dish, kept in 100°C oven and the sample stayed in the oven until steady state mass was reached for the determination of initial moisture content. Infrared drying experiments were conducted with a moisture analyzer instrument (Mettler Toledo, HG 53, Greisensee, Switzerland) operating with infrared heating at 3 W power and 160°C drying temperature. Moisture analyzer utilizes thermogravimetric principle, in which the fruit leather sample is weighted initially by the instrument before being immediately heated by the infrared dryer unit causing the moisture to evaporate. It continually measures the fruit leather's weight during the drying process and shows the moisture loss on the screen. Fruit leathers of 10 mm thickness were dried for 155 minutes, and drying data from the screen of the instrument were recorded.

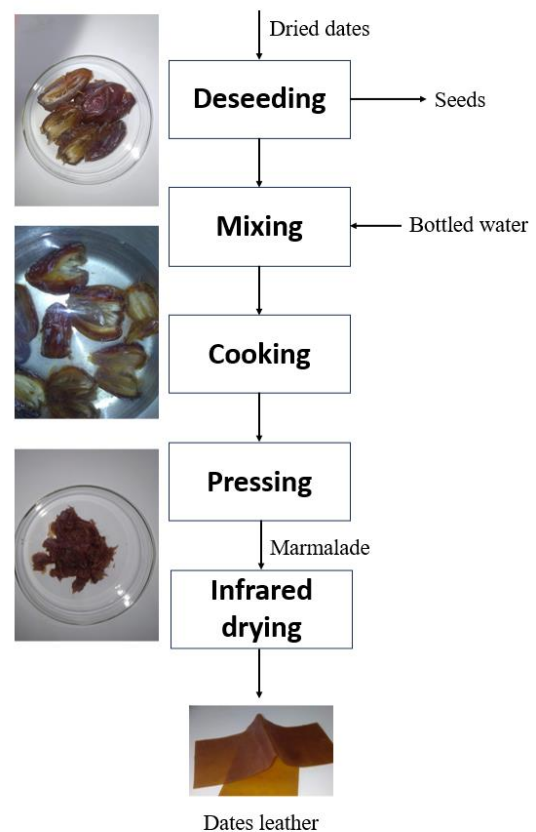


Figure 1. Preparation of fruit leather from dates

2.3 Effective moisture diffusivity

Diffusion is the main mechanism for moisture transport to the surface for evaporation, and effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) can be used to describe inherent moisture content of biological materials [30]. D_{eff} determines the diffusion characteristics of moisture [31]. Fick's Second Law of Diffusion is used to interpret experimental drying data for describing drying behavior and for determination of moisture diffusivity [32, 33]. With the assumptions of uniform initial moisture distribution, constant diffusivity, uni-dimensional moisture movement without volume change, negligible resistance, and long drying time (system reached equilibrium at the end of the drying); solution for Fick's diffusion equation can be written in the form of Equation (1) for slab [31, 32, 33, 17] as:

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (1)$$

where M_R shows moisture ratio (dimensionless), M is moisture content at any time (kg water/kg dry solids), M_e is equilibrium moisture content (kg water/kg dry solids), M_i is initial moisture content (kg water/kg dry solids), D_{eff} is effective moisture diffusion coefficient (m²/s), t is drying time (s), and L is half of the leather thickness (m). The thickness of the fruit leather samples was 10 mm.

Equation (1) can be written in a linear form by taking the natural logarithm of both sides as Equation (2) and effective moisture diffusivity was calculated from the slope of Equation (2) [31, 32].

$$\ln M_R = -\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} + \ln \frac{8}{\pi^2} \quad (2)$$

2.4 Statistical analysis

CurveExpert Professional 2.7.3 with 95% level of confidence was used to find the slope of the linear Equation (2). Fitted and experimental data were analyzed with coefficient of determination (R^2). Experiments were carried out in three replications.

3 Results and discussion

Initial moisture content of fruit leathers was found as 2.08, 1.86, and 1.39 g water/g dry solids for 30, 45, and 60 min of cooking, respectively. The effect of cooking time on drying curves for dates leather is shown in Figure 2. The moisture content of all samples decreased with the increase in drying time. Curves showed a clear effect of cooking time in the preparation stage of fruit leathers on the overall drying behavior of the samples. The impact was seen especially for the first 60 min of drying, where the moisture decrease was more rapid. This was expected since maximum amount of water in the fruit leathers was available at the initial periods of drying, thin layers of samples absorbed more heat and higher amount of moisture evaporated from the leathers was higher [25].

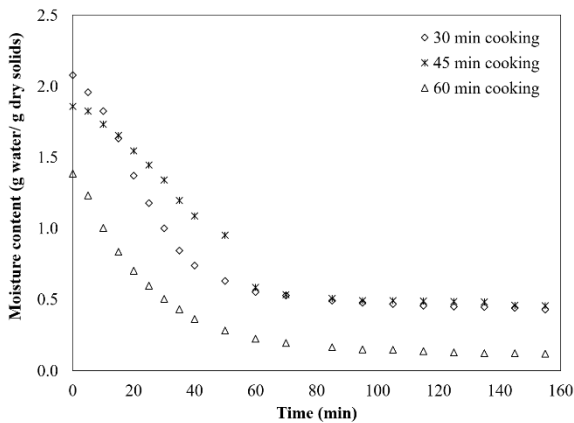


Figure 2. Effect of cooking time on moisture content during infrared drying of dates leather

It was also observed that 1.65, 1.40, and 1.27 g moisture/g dry solids were removed during 155 min of infrared drying for the fruit leathers cooked for 30, 45, and 60 min of cooking, respectively. It was seen that the highest amount of moisture was removed for the dates leather which had the shortest cooking time of 30 min. This was an anticipated result with the sample having the highest initial moisture content. There is a direct penetration to the product in infrared dryers [34]. Water possesses very strong infrared radiation absorption and the O-H bonds in water absorb

infrared energy [35]. Therefore, when there is more moisture in the product there are more O-H bonds absorbing the infrared energy and leading to more evaporation of moisture.

The effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) values were found using the experimental data and Equation (2) derived from Fick's second law of diffusion, where there is a linear relationship between $\ln M_R$ and drying time t and shown in Figure 3. R^2 values showing the agreement between the fitted and experimental values were found to be good as they were in the range of 0.9332-0.9918. After processing the data, D_{eff} of dates leather samples were calculated from the slopes of the curves given in Figure 3 as 1.53×10^{-9} , 1.70×10^{-9} and 1.74×10^{-9} m^2/s for 30, 45 and 60 min of cooking time, respectively. These values were found acceptable. Because D_{eff} of food materials is reported as in the range between 10^{-10} and 10^{-8} m^2/s in infrared drying [31, 36]. Moreover, the standard ranges for D_{eff} of agricultural products were mentioned as 10^{-11} - 10^{-9} m^2/s [27]. Although D_{eff} values for several fruit leathers are available in the literature for other drying techniques, it is difficult to find the values for the leathers produced with infrared drying. Rajoriya et al. [27] found D_{eff} of banana leathers as 9.36×10^{-11} and 1.04×10^{-10} m^2/s prepared with refractive window combined with 50 and 60°C infrared drying, respectively. Du et al. [31] obtained D_{eff} of paddy grain samples as 4.83 - 16.37×10^{-9} m^2/s with infrared drying at temperatures between 35 and 60°C.

It was also observed that as the cooking time in the preparation of leathers increased, the slope of the plots in Figure 3 and hence D_{eff} was also increased. D_{eff} shows the characteristics of the moisture mass transfer through the food, and it depends on temperature, moisture content [37], composition and porosity [38]. Since drying temperature of the equipment used in the experiments and the formulation of samples was constant, moisture content of the leathers affected the D_{eff} . The cooking time of the leathers might have an impact on D_{eff} . This might be due to the fact that as the cooking time increased moisture content decreased, and water vapor permeability increased since it gave more open pore structure [38]. The highest initial moisture content of 2.08 g water/g dry solids was seen for the sample cooked for the shortest time (30 min) and the lowest moisture content of 1.39 g water/g dry solids was observed for the one cooked for the longest time (60 min). Similarly, Younis et al. [39] reported an increase in D_{eff} with the decrease in moisture content of 2.5 mm thick infrared dried garlic slices and found D_{eff} values of 5.83×10^{-11} - 7.66×10^{-10} m^2/s at 0.075-0.3 W/cm^2 . Likewise, Sharma et al. [38] mentioned the increase of D_{eff} with the decrease in water content of infrared dried thin layer onion slices and Celma et al. [40] reported similar dependence of D_{eff} on the moisture content of thin layer infrared dried industrial tomato by-products. Another point that can be concluded from the experiments was that the hygroscopic material might approach a non-hygroscopic behavior since it lost more moisture due to evaporation during cooking which lowered the material's water-binding property.

Even though R^2 of all plots given in Figure 3 were good for the total drying time, closer examination of the data points revealed that each plot contained three separate drying zones. Therefore, D_{eff} values were also calculated separately for these zones and shown in Figures 4, 5, and 6. For the drying curve of the dates leather sample cooked for 30 min, drying zones 1, 2, and 3 were seen in the periods of 5-35, 40-70, and 85-145 min, respectively. D_{eff} values were found as 1.87×10^{-9} , 1.65×10^{-9} , and 1.23×10^{-9} m²/s by using the slopes of the plots given in Figure 4 for zones 1, 2, and 3, respectively, with higher R^2 values ranging between 0.9740 and 0.9878. Separate drying zones of 45 min cooked sample were seen in 5-50, 60-85, and 95-135 min (Figure 5) and D_{eff} were determined as 9.75×10^{-10} m²/s for zone 1, 1.53×10^{-9} m²/s for zone 2, and 3.38×10^{-10} m²/s for zone 3 with R^2 of 0.9488-0.9796. A similar behavior was also observed for the leather sample with a cooking time of 60 min. For this sample, D_{eff} was found as 1.80×10^{-9} m²/s at 5-40 min,

1.43×10^{-9} m²/s at 50-105 min, and 2.74×10^{-9} m²/s at 115-145 min by using the slopes given in Figure 6, and R^2 were found between 0.9839 and 0.9993. The change in the value of slopes through different drying zones is a sign of non-uniform drying showing initial, constant-rate and falling-rate periods. This behavior might also be attributed to the material being dried or case hardening occurred during drying. In addition, slope trends were different for each of the samples. The slope decreased for 30 min cooked leather (Figure 4), and it increased for 60 min cooked one (Figure 5) through all drying zones. On the other hand, the slope first increased from zone 1 to zone 2 and then decreased from zone 2 to zone 3 (Figure 6). These differences, which also affected the changes in D_{eff} , might be due to the increases in the deformation in the internal structures during infrared drying.

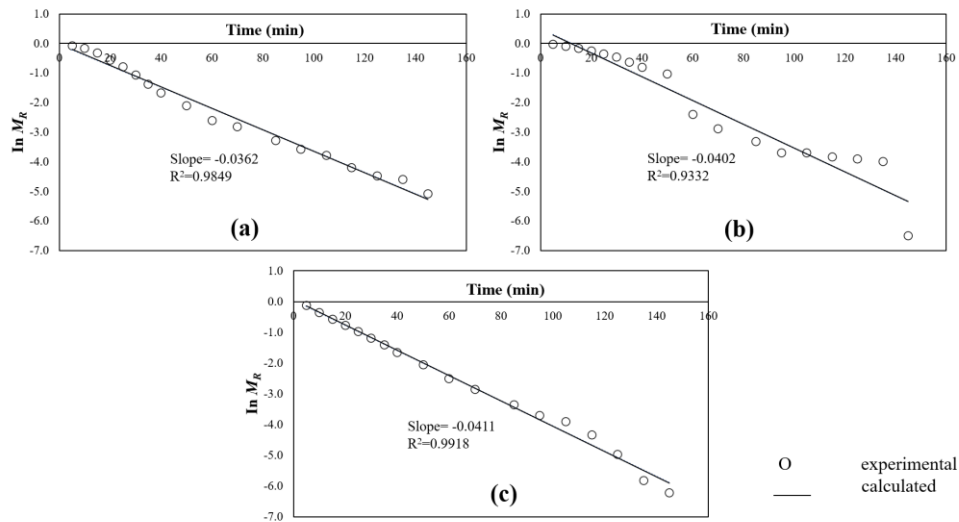


Figure 3. Values of $\ln M_R$ versus drying time t of dates leather cooked for (a) 30 min, (b) 45 min, and (c) 60 min

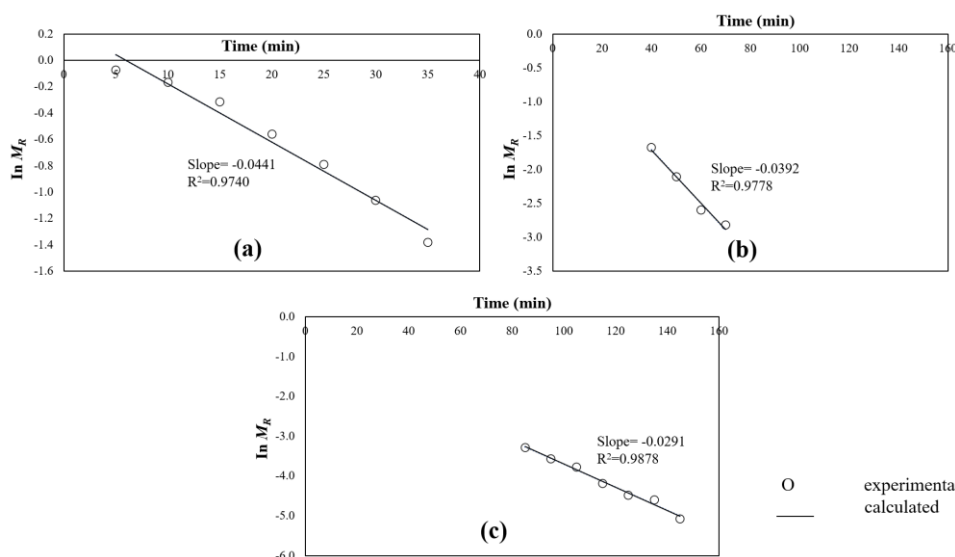


Figure 4. Values of $\ln M_R$ versus drying time t of dates leather cooked for 30 min in (a) drying zone 1, (b) drying zone 2, and (c) drying zone 3.

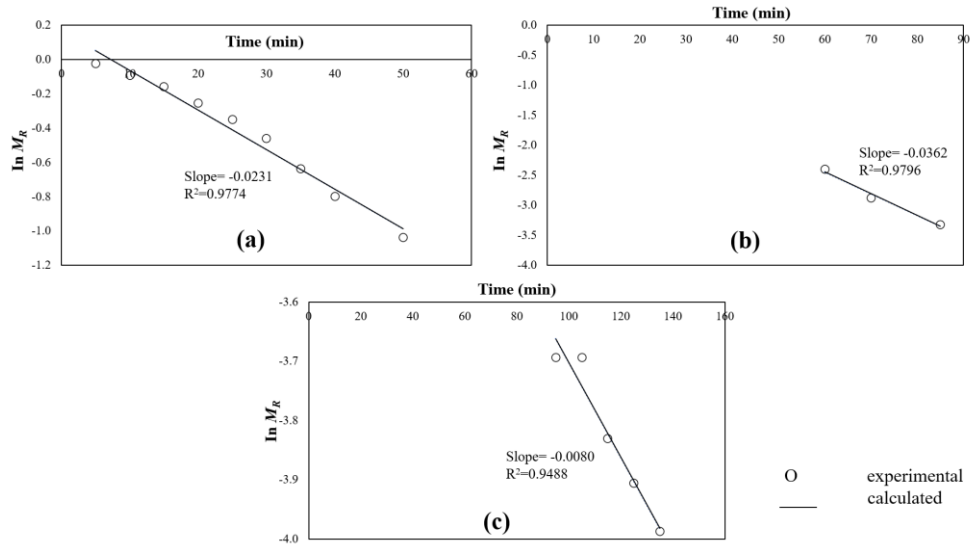


Figure 5. Values of $\ln M_R$ versus drying time t of dates leather cooked for 45 min in (a) drying zone 1, (b) drying zone 2, and (c) drying zone 3.

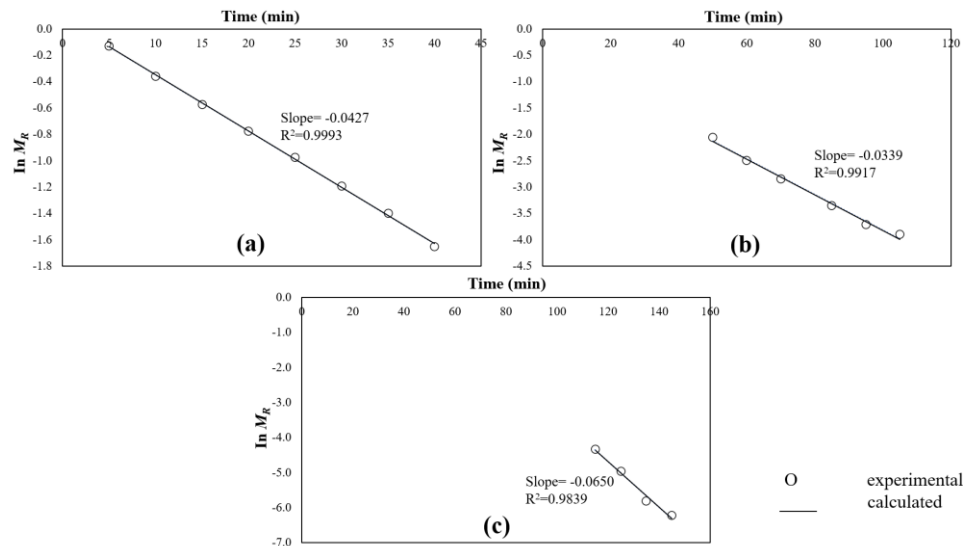


Figure 6. Values of $\ln M_R$ versus drying time t of dates leather cooked for 60 min in (a) drying zone 1, (b) drying zone 2, and (c) drying zone 3.

Table 1. Effective moisture diffusivities of dates leather with different cooking time at separate drying zones

Cooking time (min)	D_{eff} (m ² /s)			
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Average
30	1.86×10^{-9}	1.65×10^{-9}	1.23×10^{-9}	1.58×10^{-9}
45	0.98×10^{-9}	1.53×10^{-9}	0.34×10^{-9}	0.95×10^{-9}
60	1.80×10^{-9}	1.43×10^{-9}	2.74×10^{-9}	1.99×10^{-9}

Averages of the diffusivities for different drying zones were calculated and tabulated in Table 1. It was realized that the average value of D_{eff} was closer to the value fitted from Figure 3.(a) for the total drying time of 155 min for the sample cooked for 30 min, and it was in the same order of magnitude for the one cooked for 60 min when D_{eff} found from Figure 3.(b) and average value (Table 1) were compared. However, the average of D_{eff} for the three of the drying zones was 0.95×10^{-9} m²/s and it was smaller than the D_{eff} obtained from Figure 3.(c). Besides the mentioned

increase of deformations in the leather samples during drying, the change in D_{eff} during drying is a complicated process [39] since this intrinsic mass transport property of moisture includes molecular, liquid, and vapor diffusion besides hydrodynamic flow and other mechanisms [40].

4 Conclusion

Infrared drying has many advantages mainly shorter drying times and higher product quality with respect to the conventional techniques in thin-layer drying. Therefore,

thin-layer fruit leathers are very suitable healthy snack products to involve infrared dryers in the manufacturing process. In this study, date leathers with different cooking times were produced by infrared drying. Effective moisture diffusivity was affected by cooking time and found as 1.53×10^{-9} , 1.70×10^{-9} and 1.74×10^{-9} m²/s for 30, 45 and 60 min of cooking, respectively when the first order drying curves were investigated through total drying time. The cooking time of fruit leather was an important parameter to investigate since hygroscopic material might approach a non-hygroscopic behavior because it lost more water due to evaporation and lowered water binding property. The presence of three separate drying zones was realized in each plot at different time intervals when data points were examined closely in spite of the high R² for the total drying time. To explain the differences in D_{eff} is complicated as it includes molecular, liquid, and vapor diffusion besides hydrodynamic flow and other mechanisms and it might be due to the increases in the deformation in the internal structures of dates leather during infrared drying.

Another point that can be concluded from the study is that it is practical, convenient, and cost-effective for the food industry to use moisture analyzer instrument with infrared heating mechanism for the initial formulation trials in laboratory scale in small batches prior to the investment of the high-capacity industrial infrared dryers to produce thin layer fruit leather products.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] P. K. Vayalil, Bioactive compounds, nutritional and functional properties of date fruit. In: M. Siddiq, S. M. Aleid and A. A. Kader (eds.) Dates Postharvest Science, Processing Technology and Health Benefits, Wiley, pp. 285-303, Chichester, 2014.
- [2] M. A. Al-Farsi and C. Y. Lee, Nutritional and functional properties of dates: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 48(10), 877-887, 2008. <https://doi.org/10.1080/10408390701724264>.
- [3] S. Mounir, C. Tellez-Perez, K. V. Sunooj K.V. and K. Allaf, Texture and color characteristics of swell-dried ready-to-eat Zaghoul date snacks: Effect of operative parameters of instant controlled pressure drop process. Journal of Texture Studies, 51(2), 276-289, 2020. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12468>.
- [4] T. Seerangurayar, A. M. Al-Ismaili, L. H. J. Jeewantha and N. A. Al-Habsi, Effect of solar drying methods on color kinetics and texture of dates. Food and Bioprocess Processing, 116, 227-239, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.03.012>.
- [5] M. Shahbandeh, Global Dates Production 2010-2021. <https://www.statista.com/statistics/960247/dates-production-worldwide/>, Accessed 12 June 2023.
- [6] S. Manaa, M. Younsi and N. Moumami N, Study of Methods for Drying Dates; Review the Traditional Drying Methods in the Region of Touat Wilaya of Adrar-Algeria. Energy Procedia, 36, 521-524, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.060>.
- [7] M. Q. Al-Mssallem, R. M. Alqurashi R.M. and J. M. Al-Khayri, Bioactive Compounds of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.). In: H. Murthy and V. Bapat (eds.) Bioactive Compounds in Underutilized Fruits and Nuts, Springer, pp. 91-105, Cham, 2020.
- [8] J. Ahmed, F. M. Al-Jasass and M. Siddiq M, Date Fruit Composition and Nutrition. In: M. Siddiq, S. M. Aleid and A. A. Kader (eds.) Dates Postharvest Science, Processing Technology and Health Benefits, Wiley, pp. 261-283, Chichester, 2014.
- [9] A. A. Ayad, L. L. Williams, A. G. El-Rab, R. Ayivi R., H.L. Colleran, S. Aljaloud and S. A. Ibrahim, A review of the chemical composition, nutritional and health benefits of dates for their potential use in energy nutrition bars for athletes. Cogent Food and Agriculture, 6(1), 1809309, 2020. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1809309>.
- [10] K. Shivashankara, S. Isobe, M. I. Al-Haq, M. Takenaka and T. Shiina, Fruit antioxidant activity, ascorbic acid, total phenol, quercetin, and carotene of Irwin mango fruits stored at low temperature after high electric field treatment. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52 (5), 1281-1286, 2004. <http://dx.doi.org/10.1021/jf0302431>.
- [11] W. I. W. Ismail and M. N. F. M. Radzi, Evaluation of the benefits of date palm (*Phoenix dactylifera*) to the brain. Alternative and Integrative Medicine, 2(4), 1000115, 2013. <http://dx.doi.org/10.4172/2327-5162.1000115>.
- [12] L. M. Diamante, X. Bai and J. Busch, Fruit leathers: Method of preparation and effect of different conditions on qualities. International Journal of Food Science, 139890, 1-12, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/139890>.
- [13] R. W. Hartel and C. M. Nowakowski, Non-equilibrium States in Confectionery. In: B. Bhandari and Y. H. Roos (eds.) Non-Equilibrium States and Glass Transitions in Foods, Woodhead Publishing, pp. 283-301, Duxford, 2017.
- [14] D. R. Brothwell, and P. Brothwell, Food in Antiquity: A Survey of the Diet of Early Peoples. The John Hopkins University Press, Maryland, 1998.
- [15] O. Sarma, M. Kundlia, H. Chutia and C. L. Mahanta, Processing of encapsulated flaxseed oil-rich banana-based (*Dwarf cavendish*) functional fruit leather. Journal of Food Process Engineering, 46 (4), e14282, 2023. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14282>.
- [16] O. O. Kara and E. Kucukoner, Geleneksel bir meyve çerezi: Pestil. Akademik Gıda, 17 (2), 260-268, 2019. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.613621>.
- [17] A. Maskan, S. Kaya and M. Maskan, Hot air and sun drying of grape leather (pestil). Journal of Food Engineering, 54 (1), 81-88, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00188-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00188-1).
- [18] X. Huang, and F. H. Hsieh, Physical properties, sensory attributes, and consumer preference of pear fruit

- leather. *Journal of Food Science*, 70 (3), 177-186, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07133.x>.
- [19] T. Ohlsson, and N. Bengtsson, Minimal processing of foods with thermal methods. Woodhead Publishing, Cambridge, 2002.
- [20] A. S. Ginzburg, Application of infrared radiation in food processing. Leonard Hill Books, London, 1969.
- [21] P. Jones, Electromagnetic wave energy in drying processes. In: A.S. Mujumdar (ed.) *Drying*, Elsevier Science, pp. 114-136, Amsterdam, 1992.
- [22] R. Ranjan, J. Irudayaraj, and S. Jun, Simulation of infrared drying process, *Drying Technology*, 20, 363-379, 2007. <https://doi.org/10.1081/DRT-120002547>.
- [23] F. Salehi, Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 586-602, 2019. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1616243>.
- [24] S. Jaturonglumlert and T. Kiatsiriroat, Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*, 100(2), 254-260, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.007>.
- [25] S. M. R. Azam, M. Zhang, C. L. Law and A. S. Mujumdar, Effects of drying methods on quality attributes of peach (*Prunus persica*) leather. *Drying Technology*, 37 (3), 341-351, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1454942>.
- [26] R. N. A. Quintero, S. M. Demarchi and S. A. Giner, Effect of hot air, vacuum and infrared drying methods on quality of rosehip (*Rosa rubiginosa*) leathers. *International Journal of Food Science and Technology*, 49 (8), 1799-1804, 2014. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12486>.
- [27] D. Rajoriya, M. L. Bhavya and H. U. Hebbar, Far infrared assisted refractance window drying: Influence on drying characteristics and quality of banana leather. *Drying Technology*, online, 1-13, 2023. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2220777>.
- [28] R. D. S. Simão, J. O. D. Moraes, B. A. M. Carciofi and J. B. Laurindo, Recent advances in the production of fruit leathers. *Food Engineering Reviews*, 12, 68-82, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09200-4>.
- [29] F. M. Yilmaz, S. Yuksekkaya and H. Vardin, The effects of drying conditions on moisture transfer and quality of pomegranate fruit leather (pestil). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16, 33-40, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.01.003>.
- [30] A. Midilli, H. Kucuk and Z. Yapar, A new model for single-layer drying, *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513, 2007. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- [31] Y. Du, J. Yan, H. Wei, H. Xie, Y. Wu and J. Zhou, Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities. *Case Studies in Thermal Engineering*, 43, 102780, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102780>.
- [32] H. S. Gujral, D. P. S. Oberoi, R. Singh and M. Gera, Moisture diffusivity during drying of pineapple and mango leather as affected by sucrose, pectin, and maltodextrin. *International Journal of Food Properties*, 16, 359-368, 2013. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.552016>.
- [33] S. Janjai, B. K. Bala, N. Lamlert, B. Mahayothee, M. Haewsungcharern, W. Muhlbauer and J. Muller, Moisture diffusivity determination of different parts of longan fruit. *International Journal of Food Properties*, 10, 471-478, 2007. <https://doi.org/10.1080/10942910600889968>.
- [34] O. Taskin and N. Izli, Date drying by infrared dryer and mathematical modelling. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 34, 10-15, 2017.
- [35] C. Nindo, and G. Mwithiga, Infrared drying. In: Z. Pan and G.G. Atungulu (eds.) *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*, CRC Press, pp. 89-99, Florida, 2011.
- [36] N. C. Santos, R. L. J. Almeida, G. M. da Silva, S. S. Monteiro and A. M. M. C. N. André, Effect of ultrasound pre-treatment on the kinetics and thermodynamic properties of guava slices drying process. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 66, 102507, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102507>.
- [37] N. Kechaou and M. Maâlej, A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves. *Drying Technology*, 18(4-5): 1109-1125, 2000. <https://doi.org/10.1080/07373930008917758>.
- [38] G. P. Sharma, R. C. Verma and P. B. Pathare, Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67 (3), 361-366, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.002>.
- [39] M. Younis, D. Abdelkarim and A. Z. El-Abdein, Kinetics and mathematical modelling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 332-338, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.06.011>.
- [40] A. R. Celma, F. Cuadros and F. López-Rodríguez, Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Food and Bioprocess Processing*, 87 (4), 282-291, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.fbp.2008.12.003>.





Endüstriyel katı atık yönetiminde bilinç seviyesi: Niğde Bor karma ve deri ihtisas organize sanayi bölgesi örneği

Level of awareness in industrial solid waste management: Niğde Bor mixed and leather specialized organized industrial zone case

Kemal Ulusoy¹ , Nilay Kavaklı² , Fehiman Çiner^{3,*} 

^{1,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

² Niğde Bor Karma ve Deri İhtisas Organize Sanayi Bölgesi, Niğde, Türkiye

Öz

Ülkelerin üretim merkezleri olarak rağbet gören Organize sanayi bölgelerinin (OSB) oluşturduğu en önemli sorunlardan biri de endüstriyel atıklardır. Endüstrileşme hareketi kapsamında çevreye duyarlı, atık oluşumunu minimize eden, karbon ve su ayak izi düşük proses/ürün ve yaklaşımların benimsenmesi büyük önem arz etmektedir. Hali hazırda popüler konular olan endüstriyel simbiyoz ve döngüsel ekonomi de atık yönetimi kapsamında atılan önemli adımlardan birkaçıdır. Bu çalışmada, Niğde ili Bor ilçesinde bulunan Niğde Bor Karma ve Deri İhtisas Organize Sanayi Bölgesi (BORKOSB) firma ve çalışanlarının bilinç düzeyi, endüstriyel atık yönetim planları ve yıllık atık miktarının hesaplanması ele alınmıştır. Yapılan incelemelerde, bölgedeki atık yoğunluğunun deri endüstrisinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Atık yönetimi, Anket çalışması, Endüstriyel katı atık, Pearson metodu.

1 Giriş

Nüfus artışına bağlı olarak istek, ihtiyaç ve tüketim artmaktadır [1]. Son zamanlarda, hızlı ekonomik büyüme ve endüstriyel gelişme nedeniyle yerel ekonominin karakteri tarımdan sanayiye doğru değişim göstermiştir [2].

Sanayilerin kurulması ve gelişmesi; yerli üretimi artırma, istihdam yaratma, rekabet gücünü artırma, ulusal büyümeye ve kalkınmaya katkıları ile ekonomik ve sosyal kalkınmayı gözeten ve yaşam kalitesini yükseltme gibi amaçlar güden her ülkenin gelişmişlik göstergeleri olarak kategorize edilir [3]. Endüstriyel faaliyetler, yeni ürünlerin üretiminde çok fazla hammaddenin kullanılması ve bunun sonucu olarak da çok sayıda karmaşık ve tehlikeli endüstriyel atıkların oluşmasına neden olur [4-5]. Bu atıkların su, toprak ve hava gibi çevresel faktörler üzerinde ciddi etkileri vardır ve çalışanların/işçilerin sağlık ve güvenliğini tehdit eder [3].

Endüstriyel kurum ve kuruluşların sayı ve üretim kapasitesindeki artış Organize Sanayi Bölgelerinin (OSB) oluşumuna neden olmuştur. OSB'ler, sanayi faaliyetleri için hazırlanmış ve inşa edilmiş yerler olup, bir ülkenin kalkınmasında önemli rol oynamaktadır [6]. Ancak sanayi bölgeleri, çevreye salınan büyük miktarlarda biyolojik olarak

Abstract

One of the main issues arising from OIZs, often used as manufacturing hubs for nations, is industrial waste. As part of the industrialization movement, it is important to adopt processes/products and approaches that are environmentally friendly, minimize waste generation and have a low carbon and water footprint. Industrial symbiosis and circular economy, which are currently popular topics, are some of the important steps taken within the framework of waste management. This study discusses the level of awareness, industrial waste management plans and calculation of annual waste generation among the companies and employees of the Niğde Bor Mixed and Leather Specialized Organized Industrial Zone (BORKOSB) in the Bor district of Niğde province. It was found that the waste intensity in the region is caused by the leather industry.

Keywords: Waste management, Survey, Industrial solid waste, Pearson method

parçalanamayan ve kendilerine has özellikleri nedeniyle tehlikeli atıklar olarak kabul edilen atıklar üretir. Günümüzde dünyada yılda 1,1 milyar ton endüstriyel atık üretilen sanayi bölgelerinde, kanserojen ve toksik yeni kirleticiler olarak üretilen tehlikeli atık miktarının ise yılda yaklaşık 370 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Endüstriyel atıkların etkin kontrolü ve doğru yönetimi sağlık, çevrenin korunması ve doğal kaynakların yönetimi açısından önem arz etmektedir [3]. Günümüzde, büyük miktar ve çeşitlilikleri nedeniyle endüstriyel atıkların verimli yönetimi, endüstriler için ciddi bir sorundur [7].

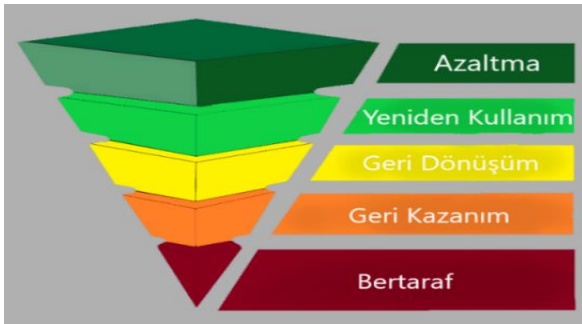
Endüstriyel atıklar, endüstriyel faaliyetler ve üretim süreçleri tarafından üretilen tüm atıkları içermekte [8-9], tür ve miktar olarak özel atık yönetim planları gerektirmektedir. Atıkların fiziksel/kimyasal ve biyolojik özellikleri, miktarı ve içerikleri atık yönetim planının belirlenmesinde ele alınması gereken önemli faktörlerdir [10]. OSB'ler endüstriyel atık oluşumunun merkezi olarak adlandırılmaktadır. Çeşitli tür ve miktarlarda çıkan atıkların yönetimi çevre ve insan sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir. OSB'lerde katı atık oluşumu nispeten daha fazladır. Bu bağlamda endüstriyel katı atık yönetimi ön plana

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fciner@ohu.edu.tr (F. Çiner)

Geliş / Received: 28.07.2023 Kabul / Accepted: 05.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1334036

çıkılmaktadır. Endüstriyel katı atıklar, atık yönetimindeki anlayış ve uygulamalarda birtakım değişikliklere sebep olmuştur. Öncelikli olarak atıkların yaşam alanlarından uzaklaştırılması yeterli gözüktüğü de artan ve kontrol edilemeyen atıkların çevre ve insan sağlığı açısından tehlike arz etmesi nedeniyle birtakım çözümlerin üretilmesi zaruri olmuştur [11]. Toplama, taşıma ve bertaraf prosesleri, Katı Atık Yönetimi (KAY)'nin 3 temel bileşenidir. KAY, oluşan atıklara bağlı olarak çeşitli düzeylerde birtakım proseslerin birlikte uygulanması faaliyetlerini içermektedir [12]. KAY'daki temel amaç, mühendislik prensiplerine ve çevreci yaklaşımlara (geri kazanım, geri dönüşüm ve bertaraf) uygun şekilde katı atık miktarını azaltmaktır. İlgili çözümlerde atık hiyerarşisi temel alınmaktadır. İlgili hiyerarşiye ait önem sıralaması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Atık hiyerarşisi

Bu çalışmada, Niğde ili Bor ilçesinde faaliyet gösteren BORKOSB'de endüstriyel atık yönetimine dair bilinç seviyesinin belirlenmesi, yıllık olası atık miktarının hesaplanması ve atık yönetiminin iyileştirilmesine dair öneriler ele alınmıştır. Anket metodolojisi baz alınarak yürütülen çalışmada sorular atık hiyerarşisi baz alınarak hazırlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma alanı

Çalışma Niğde ili, Bor ilçesinde bulunan BORKOSB'de gerçekleştirilmiştir. İlgili alan ait Google Map görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Niğde-Ankara-Aksaray yol güzergahında bulunan BORKOSB, toplam 6 970 000 m²'lik bir alana sahiptir.



Şekil 2. BORKOSB faaliyet alanı

BORKOSB faaliyet alanına ait kullanım bilgileri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. BORKOSB alan kullanım bilgileri

Kullanım Alanı (m ²)	Alan (m ²)
Sanayi parselleri alanı (m ²)	1 327 073.4
Sosyal ve idari binalar (m ²)	367 988
Yollar ve yeşil alan (m ²)	1 274 938.6
Toplam (m²)	6 970 000

Kırmızı çizgi ile çizilen bölge sonradan OSB'ye katılan kısımdır. İlave alan olarak tabir edilen bölgedir. Bu bölgede artık OSB alanı olarak anılmaktadır. Parselasyon işlemleri tamamlanmış olup tahsisler yapılmıştır. BORKOSB'de mevcut parsel sayısı 283'tür. Güncel parsel dağılımı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. BORKOSB parsel dağılımı

Parsel durumu	Adet	Oran (%)
Üretimde	136	48.05
Yapım aşamasında	24	8.48
Proje aşamasında	111	39.22
Boş	12	4.25
Toplam	283	100

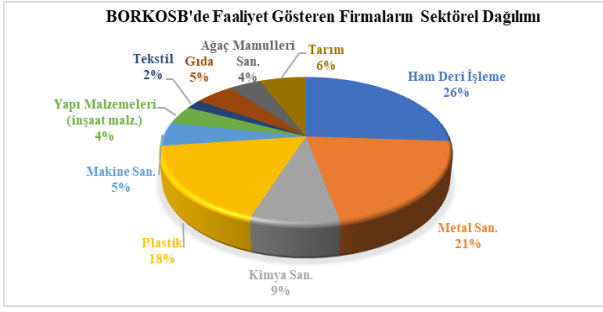
2.2 BORKOSB firma bilgisi

Bölgedeki tesisler; makine, mobilya, plastik, metal, tekstil, kimya, yapı, gıda ve deri sanayidir. 96 tesis bölgede üretim faaliyetlerini sürdürmektedir. 25 işletme ile %26'lık orana sahip deri sanayi, %20'lik oran ile metal işlem endüstrisi, %17'lik oran ile plastik sanayi üretimdeki başlıca sektörlerdir. 2023 yılında BORKOSB'de faaliyet gösteren firma sayısı 96'dır. İlgili tesislere ait sayılar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. BORKOSB faaliyet gösteren sektör ve firma sayıları

Sektör	Sayı
Deri	25
Metal	20
Plastik	17
Kimya	8
Tarım	6
Makine	5
Gıda	5
Yapı	4
Ağaç Mamulleri	4
Tekstil	2
Toplam	96

Ayrıca firmaların sektör bazlı dağılım yüzdelerine ait grafik Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. BORKOSB'de faaliyet gösteren firmaların sektör bazlı dağılımı

2.3 Araştırma türü

Bu çalışmada, nicel araştırma modellerinden kesitsel tasarım modeli ele alınmıştır. Kâğıt anket konseptinde, hedef kitle olan BORKOSB firma çalışanlarının atık ve atık yönetimi hakkındaki bilinç düzeyinin belirlenmesi ve olası atık miktarının hesaplanması amaçlanmıştır.

2.3.1 Anket çalışması

Anket çalışması iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde atık ve atık yönetimine ait sorularla katılımcının güncel atık ve atık yönetimine dair bilgi seviyesinin ölçülmesi amaçlanmaktadır. İkinci kısımda ise katılımcıların, hammadde, üretim ve atık oluşumu konularında bilgi seviyeleri saptanmaktadır. Anket çalışması için BORKOSB Müdürlüğünden gerekli izinler alınmış olup katılımcılara uygulanan anket formu, yüz yüze anket yöntemi baz alınarak katılımcılar tarafından doldurulmuştur. İlgili anket formuna Şekil 4'te yer verilmiştir.

BOR KARMA VE DERİ İHTİSAS ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ'NDEKİ FABRİKALARDAN KAYNAKLI ATIKLARA YÖNELİK ANKET FORMU

Firma Adı:
Yetkili:
Yetkilinin Eğitim Durumu:
Yetkilinin Mesleği:
Telefon:
Üretim Sektörü:
Üretilen Ürünler:
Üretilen Ürünlerin Kullanılan Alanları:
Kullanılan Hammaddeler ve yan ürünler:
Hammadde Temin Edilme Yeri:

ANKET:

- Atık nedir?
 Ekonomik değeri olmayan
 Çevreyi kirlüten
 Hem ekonomik değeri olmayan hem de çevreyi kirlüten
 İşletmede kalmasını istemediklerimiz
 Ekonomik değeri olan
- Atık Yönetimi size ne ifade eder?
 Atığın kaynağından bertarafına kadar işlemleri içeren bir yönetim biçimidir.
 Atık kontrolü ve bertarafı planıdır.
 Atıkların belirli bir yerde düzenli olarak bekletilmesidir.
 Bilmiyorum.
- Atıkların değerlendirme yöntemleri nelerdir?
 Geri Kazanım
 Geri Dönüşüm
 Yakma
 Düzenli Depolama
 Diğer
- İşletmenizde Endüstriyel Atık Yönetim Planlaması var mıdır?
 Evet
 Hayır
- Atık Yönetimi Yönetmeliği hakkında bilgi sahibisiniz?
 Evet
 Hayır
- Atık muhafaza yöntemleri nelerdir?
 İşletmede depolama.
 Yetkili anlaşmalı firmaya veririm.
 Belediyeye çöp konteynırına atarım.
 Bilmiyorum.
- Geri Kazanım ve Geri Dönüşüm size ne ifade eder?
 Yeni bir ürün elde etmedir
 Tekrar kullanmak
 Bilmiyorum
 Her ikisi
- İşletmelerden çıkan atıkların geri kazanıma ve geri dönüşüme katılma oranları sizce ne kadardır?
 %0
 %0- %25
 %25-%50
 %50-%75
 %75-%100
- İşletmenizde oluşan atık miktarı ne kadardır?

Şekil 4. Anket formu

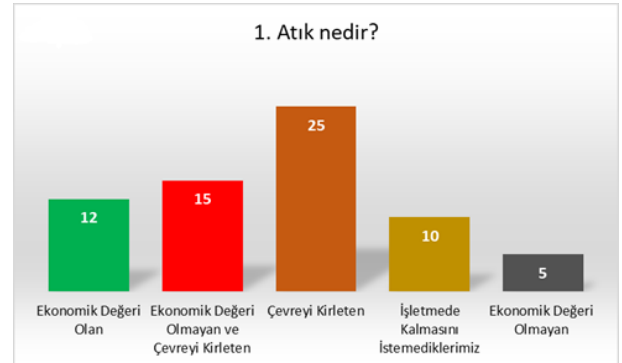
2.4 İstatistiksel değerlendirme (Korelasyon)

Anket sonucunda elde edilen veriler IBM SPSS v26.0 paket programı aracılığıyla analiz edilmiştir. Çalışmada, korelasyonel çalışma yöntemi Pearson metodu kullanılarak ele alınmıştır. İlgili yöntemde, en az iki değişken arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. İlişkinin belirlenmesi hususu nedensellik ilişkisi yerine birlikte değişim ya da paralellik ilişkisini kapsamaktadır [13]. Değişkenlerin birlikte artma ya da azalmaları neticesinde korelasyon ilişkisinin yüksek olduğu belirtilmektedir. Korelasyon neden-sonuç ilişkisinin bir göstergesi değildir, ancak neden-sonuç ilişkisinin olabileceğine dair kanıtlar sunmaktadır [14,15].

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Anket sonuçlarına ilişkin bulgular

Anket sorularına şekil başlıklarında yer verilmiştir. İlgili sorulara ait cevaplar ise grafik halinde görselleştirilerek paylaşılmıştır. Verilen cevaplara göre, BORKOSB'de faaliyet gösteren işletmeler atığı “çevreyi kirlüten” olarak nitelendirmektedir. 25 işletme anketin 1. sorusu (Şekil 5) kapsamında ilgili cevabı işaretlemiştir. Bu cevap katılımcıların yaklaşık %37'sini oluşturmaktadır. Atık yönetimi ile ilgili bilgi seviyesini ölçmek için hazırlanan anketin 2. sorusuna (Şekil 6) ise katılımcılar, yaklaşık %96'lık bir oranla “Atığın kaynağından bertarafına kadar işlemleri içeren bir yönetim biçimidir.” yanıtını vermişlerdir. Anketin, atık değerlendirme yöntemleri kapsamında hazırlanan 3. sorusuna (Şekil 7) ise katılımcıların yaklaşık %30'u “Geri dönüşüm ve geri kazanım” cevabını verirken, en sık verilen cevap yaklaşık %33 ile “Sadece geri kazanım” yanıtı olmuştur. OSB ölçeğinde endüstriyel atık yönetim planlaması çevresel, sosyal ve ekonomik kazanımlar sağlamaktadır. Bu bakımdan katılımcılara anketin 4. sorusu (Şekil 8) yöneltilmiştir. 64 katılımcının yanıtı “Evet” olurken, “3” katılımcı soruya “Hayır” yanıtını vermiştir. %96 gibi yüksek bir oranla OSB genelinde endüstriyel atık yönetim planının var olması atık yönetimi kapsamında olumlu bir izlenim yaratmaktadır. İlgili sonuçlara Şekil 5, 6, 7 ve 8'de yer verilmiştir.



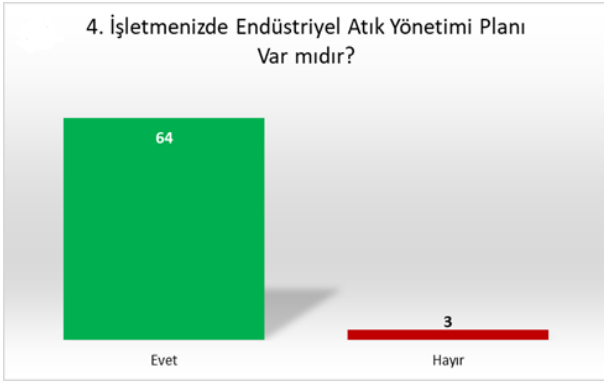
Şekil 5. Anketin 1. sorusuna ait cevap dağılımları



Şekil 6. Anketin 2. sorusuna ait cevap dağılımları



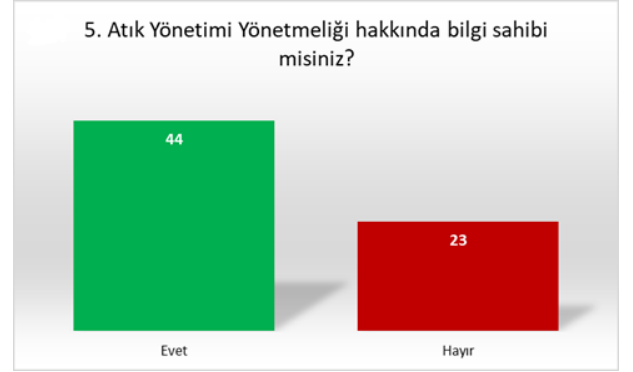
Şekil 7. Anketin 3. sorusuna ait cevap dağılımları



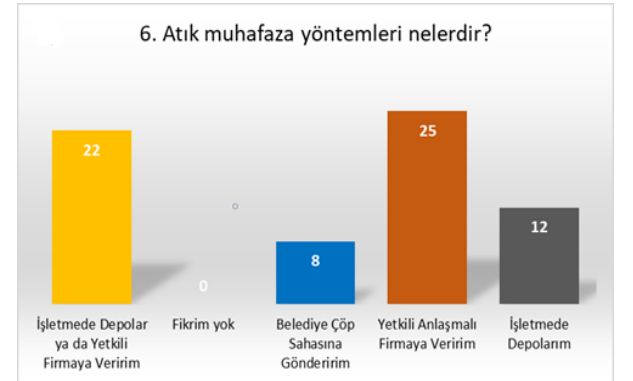
Şekil 8. Anketin 4. sorusuna ait cevap dağılımları

Anketin 5. sorusu (Şekil 9) kapsamında 44 katılımcı “Evet”, 23 katılımcı ise “Hayır” cevabını vermiştir. Özellikle atık yönetiminin uygulanabilmesi için uygulamalara yönelik kısıtların belirlendiği ve yayımlandığı yönetmelik ve kanunların bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle katılımcılara yönetmelik ve kanunlar kapsamında eğitim verilmesi ve/ya bilgilendirilmesi öncelikli sorunlardan biri olarak saptanmıştır. Anketin 6. sorusuna (Şekil 10) verilen cevaplar ise genellikle yetkili/lisanslı firmalara atıkların verilmesini veya işletmede depolanmasını içermektedir. Belediyelerin çöp sahalarına atık gönderen katılımcı/işletme sayısı ise sekiz olarak saptanmıştır. Anketin 7. sorusu (Şekil 11) için 44 katılımcı “Tekrar kullanmak veya yeni bir ürün elde etmek” cevabını verirken, sekiz katılımcı “yeni bir ürün

elde etmek”, 15’i ise “tekrar kullanmak” şıklarını işaretlemiştir. Anket çalışmasının atık yönetimi kapsamındaki son sorusu olan 8. soruda (Şekil 12), yüzdesel olarak istenilen cevaplar istenmiştir. Bu bağlamda %0, %1-25, %26-50, %51-75 ve %76-100 aralıkları seçenekler olarak belirlenmiştir. Cevap dağılımı ise sırasıyla; 5, 10, 3, 12 ve 37’dir. İlgili sonuçlara Şekil 9, 10, 11 ve 12’de yer verilmiştir.



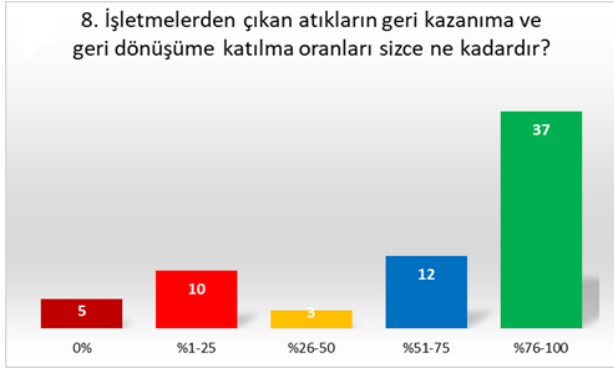
Şekil 9. Anketin 5. sorusuna ait cevap dağılımları



Şekil 10. Anketin 6. sorusuna ait cevap dağılımları



Şekil 11. Anketin 7. sorusuna ait cevap dağılımları



Şekil 12. Anketin 8. sorusuna ait cevap dağılımları

3.2 İstatistiksel değerlendirme bulguları

Ankette yer alan ve Şekil 8, 9 ve 12’de cevap dağılımları verilen sorulara ilişkin istatistiksel sonuçlar ise Şekil 13’te verilmiştir. Pearson metodu baz alınarak yapılan değerlendirmelerde üç anket sorusuna verilen cevaplar (Şekil 8, 9 ve 12’de yer alan ilgili cevaplar) değişken tayin edilmiştir. Bunlar;

- Yönetim planı: Şekil 8 cevapları
 - Yönbilgi: Şekil 9 cevapları
 - Geridönüşüm: Şekil 12 cevapları
- olarak gruplandırılmıştır.

Korelasyon ilişki analizi sonucu elde edilen veriler ise şu şekildedir:

Geridönüşüm değişkeni ile Yönetim planı ve Yön Bilgi değişkenleri arasında 0.01 düzeyinde güven aralığı ilişkisi saptanmıştır.

Geridönüşüm değişkeninde geri dönüşüm oranını \geq %51 olarak belirten işletmelerin veya katılımcıların etkin bir atık yönetim planına sahip olduğu tespit edilmiştir.

YönetimPlanı ve YönBilgi değişkenleri arasında ise 0.05 düzeyinde güven aralığı ilişkisi saptanmıştır.

Her üç sonuçta da değişkenler arasında pozitif yönde anlamlı ilişki olduğu belirlenmiştir.

Correlations				
		Geridönüşüm	Yönetimplanı	YönBilgi
Geridönüşüm	Pearson Correlation	1	,371**	,890**
	Sig. (2-tailed)		,002	,000
	N	67	67	67
Yönetimplanı	Pearson Correlation	,371**	1	,299*
	Sig. (2-tailed)	,002		,014
	N	67	67	67
YönBilgi	Pearson Correlation	,890**	,299*	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,014	
	N	67	67	67

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Şekil 13. Korelasyon analiz sonucu

3.3 Üretim ve atık bilgilerine ilişkin bulgular

BORKOSB’de faaliyet gösteren sektörlerle ait üretim ve oluşan atık bilgileri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. BORKOSB’de faaliyet gösteren sektörlerle ait üretim ve oluşan atık bilgileri

Sektör	Hammadde	Ürün	Atık
Deri	Ham deri	Kemer Ayakkabı Çanta derisi	Kireçleme, sıyırma ve tırşlama atığı
Metal	Hurda metal	Hurda metal geri kazanımı	Demir, çelik, teneke, metal talaş
		Çöp konteynırı Pirinç çubuk üretimi Ferforje malzemeler Külçe bakır ve kablo	
Kimya	Atık madeni yağlar Elenmiş çinko külü Amonyum Sülfat Datemul 3772 İsopropilamin Macozeb Kükürt 2,4 Dasit Hidrojen Peroksit	Deri kimyasalı Zirai ilaç Çinko oksit ve madeni yağ üretimi	Atık madeni yağ Çinko külü Ambalaj atığı
		Granül plastik ve boru üretimi	Torba ve poşet
Plastik	Hurda plastik	Yedek parça üretimi Otomatik kapı	Demirli ve demirsiz metal parçalar
Makine	Demir sac	Kum Çimento Çakıl İnşaat demiri	Moloz ve demir parçaları
Yapı		Keçe ve iplik üretimi	Elyaf
Tekstil	Tekstil atıkları	Nişasta Şeker Sitrik asit Yaş meyve ve sebze	Şekerleme tozları Ambalaj atıkları Meyve ve sebze posası
Gıda		Kereste Talaş Kuru ağaç	Palet Pelet
Ağaç Mamulleri		Amonyum ve nitrat tuzları	Sıvı ve katı gübre Yem
Tarım		Kuru ağaç ve türevleri Biyobozunur malzemeler	Elektrik enerjisi
Enerji			Ağaç atıkları

Anket çalışmasında, işletmelerin atık miktarlarına dair verilen cevaplara göre yıllık katı atık miktarları hesaplanmış olup değerlendirmede işletmelerin yılda 300 gün çalıştığı kabul alınmıştır. İlgili hesaplama sonuçları **Tablo 5**'te verilmiştir.

Tablo 5. BORKOSB'de faaliyet gösteren işletmelerin hesapla elde edilen atık miktarları

<i>Faaliyet Gösterilen Sektör</i>	<i>Firma Sayısı</i>	<i>Atık miktarı (ton/yıl)</i>
Deri	25	22151
Metal	20	180
Plastik	17	17
Kimya	8	217
Tarım	6	112
Makine	5	25
Gıda	5	58
Yapı	4	40
Ağaç Mamulleri	4	900
Tekstil	2	420
Kontamine Atık (Ambalaj, atık çamur, iş kıyafeti vb.)	-	900
Toplam*	96	25020

*: İşletmelerin ortalama 300 gün çalıştığı kabul edilmiştir.

Literatürde, endüstriyel atık yönetimini kapsayan çalışmalar mevcuttur. Güden [16] tarafından 2011'de yapılan çalışma, Merzifon OSB'de atık potansiyelinin belirlenmesini ele almaktadır. Anket çalışması metodu uygulanan çalışmada, atıkların %81'inin geri kazanıldığı tespit edilmiştir. Bölgede, metal ve plastik sektörünün geri kazanım konusunda ön plana çıktığı vurgulanmaktadır. Patricio vd. [17] tarafından Lizbon Metropolitan Bölgesi'nde (LMA) yapılan çalışmada, malzeme akış analizi uygulanarak, potansiyel atık miktarı belirlenmiştir. Ek olarak, atık kompozisyonunu belirlemek ve geri kazanım çözümleri üretmek amacıyla veri tabanı geliştirilmiş olup, geri kazanım ağının iyileştirilmesi için gelecek önerilerinde bulunulmuştur. Çalışmanın sonucunda ise bölgede oluşan atık miktarının %79.1'inin geri kazanıldığı saptanmıştır. Bu çalışmada, geri kazanım oranı ile ilgili elde edilen sonuç ise %58.8 olmuştur. Literatürde yer alan çalışmalarda geri kazanım oranının daha yüksek olduğu ve atık yönetiminde birtakım iyileştirmelerin yapılması gerektiği saptanmıştır.

Ulusal [18] tarafından sıfır atık konusunda bilinç düzeyinin gelir düzeyi ile korelasyon ilişkisini ortaya koyan çalışmada, katılımcıların %74'ünün konu hakkında bilgi sahibi olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, katılımcıların gelir seviyesi ile sıfır atık bilinç düzeyleri arasında pozitif ilişki olduğu aktarılmaktadır. Benzer bir ilişkinin, atık yönetimi yönetmeliği hakkında bilgi sahibi olma (**Şekil 9**) ile geri dönüşüm ve geri kazanım oranının yüksek olması (**Şekil 12**) durumu arasında olduğu yapılan istatistiksel değerlendirme sonucu (**Şekil 13**) tespit edilmiştir. İki durum arasında 0.01 düzeyinde güven aralığı tespit edilmiş olup, değişkenler arasında pozitif yönde kuvvetli bir ilişki olduğu bulunmuştur.

4 Sonuçlar

BORKOSB'de 25 020 ton/yıl endüstriyel katı atık üretilmektedir. Yıllık 22 151 tonluk atık oluşumu ile deri sektörü, BORKOSB bünyesinde en yüksek atık oluşumuna sahip sektör olarak belirlenmiştir. Deri sektörü yetkililerince verilen cevaplara göre; deri sektöründe oluşan atıkların bertarafı ya da geri dönüşümü konusunda etkili bir atık yönetim planı bulunmadığı ve atıkların işletmede bekletildiği tespit edilmiştir. Ayrıca yetkililer, faaliyetlerine bağlı olarak gelişen herhangi bir çevre problemi olmadığını belirtmişlerdir. Elde edilen veriler doğrultusunda firmaların çevre kirliliği ve sorunlarına yönelik yeterli bilgi ve algı düzeyine sahip olmadıkları belirlenmiştir. BORKOSB'de yer alan tesislerin kanun ve yönetmelikler konusunda yeterli bilgi düzeyine sahip olmadığı saptanmıştır. Anket çalışmasına katkıda bulunan tesislerin tamamında Çevre yönetim hizmeti alınmadığı veya tam zamanlı bir çevre görevlisi çalıştırılmadığı tespit edilmiştir.

Çalışmanın olumlu sonuçları da mevcuttur. BORKOSB bünyesinde yer alan geri dönüşüm firmaları, bölgedeki tesisler tarafından açığa çıkan kontamine ambalaj atıkları veya tehlikesiz ambalaj atıklarını değerlendirmektedir. Metal atıklarının ise tamamı geri kazanılmaktadır. Önemli kazanımlardan biri de ağaç endüstrisinde kaynaklı atıkların diğer tesislerde yakıt olarak kullanılmasıdır. Endüstriyel simbiyoz uygulamalarına örnek olabilecek bu yaklaşım nedeniyle katı atık oluşumu azalmakta ve hem çevresel hem de ekonomik kazanımlar elde edilmektedir.

Hem anket çalışmasında verilen cevaplar hem de anket çalışması kapsamında yapılan ziyaretlerdeki atık yönetimi gözlemleri neticesinde atıkların çöp olarak değerlendirildiği gözlemlenmiştir. Atıkların ekonomik değere sahip olduğu farkındalığı sadece geri dönüşüm tesislerince bilinmektedir. Bu bağlamda, var olan sorunların çözümü için bazı önerilerde bulunulmuştur. Bunlar; (i) BORKOSB özelinde entegre atık yönetim sisteminin kurulması, (ii) kaynakların etkin kullanımı için, endüstriyel simbiyoz uygulamalarının desteklenmesi ve fizibilite raporlarının hazırlanması, (iii) atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanımının teşvik edilmesi, (iv) atık hiyerarşisi baz alınarak atık oluşumunu önleyici veya azaltıcı uygulamaların belirlenmesi, uygulanması ve denetlenmesi, ve belki de en önemlisi olan (v) gerekli iş gücüne ve karar vericilere atık yönetimi kapsamında çeşitli eğitimler verilmesi ve (vi) Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı/Müdürlüğü tarafından denetimlerin arttırılmasıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

- [1] T.H. Christensen, Introduction to waste management. In: Christensen, T. H. (Ed.), Solid Waste Technology & Management. Blackwell Publishing Ltd, pp. 2-16. 2011.
- [2] E. Thomanetz, Solid recovered fuels in the cement industry with special respect to hazardous waste. Waste

- Management & Research. 30(4):404-412. 2012. [10.1177/0734242X12440480](https://doi.org/10.1177/0734242X12440480)
- [3] H. Alidadi, A.A. Mohammadi, A.A. Najafpoor, A. Dehghan, S. Zamand, V. Taghavimanesh, Survey of wastes management status of Khayyam industrial estate in Neyshabur City (Northeastern Iran) in 2017. *MethodX*, 482-491. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.018>
- [4] G. Salihoğlu, Industrial hazardous waste management in Turkey: Current state of the field and primary challenges, *Journal of Hazardous Materials*, 177:42-56. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.096>
- [5] F. Nishad, R. Raghava, U. Balachandran Nair. Tannery Solid Waste to Treat Toxic Liquid Wastes: A New Holistic Paradigm. *Environmental Engineering Science*. 363-372. 2012. <http://doi.org/10.1089/ees.2010.0445>
- [6] M. Homan, E. Bazrafshan, F. Kord-Mostafapour, Qualitative and quantitative analysis of industrial zone waste products, (Case study Merjaveh Industrial Zone-Zahedan), *Int. Res. J. Appl. Basic Sci.* 8(5):576-583. 2014.
- [7] Y. Geng, Q. Zhu, M. Haight, Planning for integrated solid waste management at the industrial Park level: A case of Tianjin, China, *Waste Management*, 27(1):141-150. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.013>
- [8] N.T.K. Thai, Hazardous industrial waste management in Vietnam: current status and future direction, *J Mater Cycles Waste Manag.* 11:258-262. 2009. [10.1007/s10163-009-0239-3](https://doi.org/10.1007/s10163-009-0239-3)
- [9] L. Li, S. Wang, Y. Lin, W. Liu, T. Chi, A covering model application on Chinese industrial hazardous waste management based on integer program method, *Ecological Indicators*, 51:237-243. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.001>
- [10] G. Sağlam, Kastamonu Organize Sanayi Bölgesi atık yönetiminin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2015.
- [11] Q. Song, H. Li, and X. Zeng, Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. *Journal of Cleaner Production*, 104: 199-210. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.027>
- [12] R. Zagozewski, I. Judd Henry, S. Nilson, and L. Bharadwaj, Perspectives of past and present waste disposal practices: A community based participatory research project in three Saskatchewan first nations communities. *J. Environmental Health Insights*, 5, 9-20. 2011. <https://doi.org/10.4137/EHI.S6974>
- [13] Ş. Büyüköztürk, E.K. Çakmak, Ö.E. Akgün, Ş. Karadeniz & F. Demirel, Bilimsel araştırma yöntemleri (22. baskı). Pegem Akademi. 2016.
- [14] S. Gürbüz, & F. Şahin, Sosyal bilimlerde araştırma yöntemleri: Felsefe-yöntem-analiz (4. baskı), 2017.
- [15] T. Karadavut, Bağımsız korelasyon katsayıları için hipotez testleri: SPSS ve Microsoft Excel uygulamaları. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 21(2), 375-389. 2021. <https://dx.doi.org/10.17240/aibuefd.2021.21.62826-810642>
- [16] Ö.H. Güden, Amasya Merzifon Organize Sanayi Bölgesi'nde endüstriyel atık yönetiminin incelenmesi ve çözüm önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2011
- [17] J. Patricio, I. Costa, S. Niza, Urban material cycle closing-assesment of industrial waste management in Lisbon region. *Journal of Cleaner Production*, 106, 389-399, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.069>
- [18] Ö. Ulusal, Yetişkin bireylerin sıfır atık hakkındaki bilgi tutum ve davranışlarının değerlendirilmesi (Karatay örneği). (Yayımlanmamış doktora tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Halk Sağlığı Anabilim Dalı, Konya. 2022.





Effect of drilling parameters on hole quality in drilling of pultruded GFRP composite material: Surface roughness, thrust force and delamination factor

Pultrüzyon ile üretilen GFRP kompozit malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin delik kalitesine etkisi: Yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti ve delaminasyon faktörü

Kaan Emre Engin¹ , Harun Yaka^{2,*} 

¹ Adıyaman University, Department of Mechanical Engineering, 02040, Adıyaman, Türkiye

² Amasya University, Department of Mechanical Engineering, 05100, Amasya, Turkey

Abstract

The use of fiber reinforced composite materials (FRP) has increased in many areas. These materials need to be processed with some machining methods according to their usage areas, but their machinability is difficult. In this study, surface roughness (SR), delamination factor (F_d) and thrust forces were investigated in the drilling of glass fiber reinforced composite material (GFRP) produced by pultrusion with a coated and uncoated drill. Microstructures of chips formed during drilling were investigated and their effects on surface roughness were determined. Three different cutting speeds (60, 70, 80 m/min) and feed rates (0.06, 0.09, 0.12 mm/min) were selected as machining parameters. At the end of the study, it was found that feed rate had a more significant effect on surface roughness, delamination factor and thrust force. It was observed that as the cutting speed increased, the surface roughness, thrust force and delamination factor decreased. The lowest thrust force and F_d occurred at a cutting speed of 80 m/min and a feed rate of 0.06 mm/min. However, the lowest SR was obtained at a cutting speed of 70 m/min and a feed rate of 0.06 mm/min. Better results were obtained with TiN coated drills compared to uncoated drills.

Keywords: GFRP, Drilling, Delamination factor, Thrust force, Surface roughness

1 Introduction

Fiber-reinforced polymers (FRPs) have many advantages, but it is challenging to machine FRP composites due to their anisotropy. The drilling procedure for these materials presents distinct challenges that are not typically encountered in other material types. The delamination between layers, protrusion of fibers from the drilled hole edges of the composite, commonly referred to as fiber pull-out, spalling of the composite, hole shrinkage and thermal degradation are common defects that can occur during FRP composite drilling [1]. The presence of delamination in the drilled hole is widely recognized as a critical defect that can lower the strength of the material. This defect has the potential to adversely affect the durability of the composite, leading to a shortened service life when subjected to cyclic

Öz

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin birçok alanda kullanımı artmıştır. Bu malzemeler kullanım alanlarına göre bazı talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi gerekmektedir fakat işlenebilirlikleri zordur. Bu çalışmada pultrüzyon ile üretilmiş cam fiber takviyeli kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız matkap ile delinmesinde yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon faktörü ve itme kuvvetleri incelenmiştir. Delme sırasında oluşan talaşların mikro yapıları incelenmiş ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri belirlenmiştir. İşleme parametreleri olarak üç farklı kesme hızı (60,70, 80 m/dk) ve ilerleme oranı (0.06, 0.09, 0.12 mm/dk) seçilmiştir. Çalışma sonunda, ilerleme oranı yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon faktörü ve itme kuvveti üzerinde daha belirgin etki yaptığı bulunmuştur. Kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti ve delaminasyon faktörünün azaldığı görülmüştür. İtme kuvveti ve delaminasyon faktörü en düşük 80 m/dk kesme hızı ve 0.06 mm/dk ilerleme oranında oluşmuştur. Ancak en düşük yüzey pürüzlülüğü 70 m/dk kesme hızı ve 0.06 mm/dk ilerleme oranında çıkmıştır. TiN kaplı matkaplarda kaplamasız matkaplara kıyasla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: GFRP, Delme, Delaminasyon faktörü, İtme kuvveti, Yüzey pürüzlülüğü

loading conditions. The phenomenon of delamination has the potential to impose restrictions on the utilization of FRPs in the domain of structural engineering [2-5].

Glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites have become prevalent in a variety of technical fields, including the automotive, aircraft, and sea vehicle industries, as well as in the manufacture of spaceships. This is due to the several advantages that GFRP composites offer. GFRP composites possess a range of advantageous characteristics, including notable specific stiffness and strength, suitability for use in lightweight constructions, resistance to fatigue, and resilience to chemical exposure. The composites of FRPs also display a low level of thermal conductivity [6]. The aforementioned errors are relevant to GFRP composites and

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: harun.yaka@amasya.edu.tr (H. Yaka)

Geliş / Recieved: 31.07.2023 Kabul / Accepted: 18.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1335448

represent a significant area of investigation aimed at improving the drilled hole quality of GFRP materials.

In their study, Kılıçkap et al. [7] performed drilling on GFRP woven composites made of uni-directional (UD), $\pm 45^\circ$ and $0/90^\circ$ glass fibers. The findings put forward that different values of feed rate along with cutting speed exert notable impacts on the process outcomes. The temperature got lowered as the feed rate increased, whereas cutting speed rise resulted in an elevation of the cutting temperature. They also established the importance of delamination and composite strength's relation.

Chadha et al. [8], conducted an analysis for different parameters which have effects in the process of drilling GFRP's. The researchers examined multiple parameters, to analyze the delamination in the composite material. The study employed to achieve the objective of minimizing delamination.

The severity of residual tensile strength for unidirectional glass fiber embedded epoxy materials after drilling was assessed by Kishore et al. [9]. The investigation has established the most suited parameters of drill point geometry, cutting speed, and feed rate to attain the maximum residual tensile strength in drilled UD-GFRP laminates. The findings of the study indicate that the residual tensile strength of drilled laminates is notably influenced by the damage caused during drilling, particularly when higher cutting speeds are employed.

Mohan et al. [10], employed the Taguchi approach to enhance drilling performance in GFRP composite materials by optimizing cutting parameters. The impact of various factors on the drilling outcomes was assessed using ANOVA. Experiments were executed on a CNC machining center to investigate the correlation between material parameters and the process of cutting. According to the findings of the Taguchi method analysis, it was determined that the thrust force was more influenced by the speed and drill size rather than the thickness of the specimen and the feed rate.

Shunmugesh et al. [11], studied optimizing the GFRP composite drilling. The experiment utilized a drilling method that followed the $L_{27}(3^{13})$ orthogonal array. The experiment sought to observe how various parameters have affected certain characteristics, namely the delamination factor and surface roughness (Ra and Rz). The feed rate parameter had the most dominant effects on the delamination factor and surface roughness (Ra and Rz) performance measures.

Bhat et al. [12], performed drilling operation on three different thicknesses. The purpose of this study was to assess the extent of damage caused to the workpiece. Thickness accounted for 21.30% of the total variance. When examining the impact of speed and feed variation, it became evident that the 8 mm thick composite laminate demonstrated superior performance.

Khshaba et al. [13], researched the effects of drilling parameters, experimentally and how they influenced mechanical and thermal aspects of GFRP workpieces. They utilized sensors and thermal cameras to observe the heat-affected zone (HAZ) and to measure the temperature at drill point. Then, with purpose of optimizing the process, they

employed regression analysis to establish relationships between drilling factors and outcomes. It was noted that the thrust force is primarily affected by the feed rate, with a significant impact. On the other hand, the sway of cutting speed on the thrust force was observed to be minor and negligible. These findings highlight the importance of considering these factors when analyzing temperature variations in machining processes.

Erturk et al. [14], performed parameter optimization on the drilling process of continuous GFRP composite materials. The drilling capacity was assessed by utilizing a drilling system that incorporated different drill bit types, feed rates, and spindle speeds. The findings suggested that the effectiveness of the drilling operation is influenced by the type of coating applied to the tool.

Rubio et al. [15], used high-speed machining (HSM), particularly drilling GFRP composites utilizing three distinct geometries of drill bits. The researchers performed drilling experiments using a machining center equipped with 11kW of spindle power and 10,000 rpm of spindle speed. They used an aerostatic headstock having maximum rotational speed of 40,000 rpm. They manufactured laminates using hand lay-up method. Three cemented carbide drills that had a diameter of 5mm and different helical angles were used for the drilling experiments. They found that increasing the speed resulted in lowering of delamination. With increased feed rate, the incidence of delamination was seen to rise.

Studies show that drilling is generally done on hand lay-up FRP materials. In addition, in drilling operations, tool tip geometry is generally considered and drill coatings are not taken into account sufficiently.

The current investigation pertains to the drilling procedure of a GFRP composite of 25 mm thickness, which was fabricated using the pultrusion technique. The drilling procedure was conducted utilizing an uncoated solid carbide and a solid carbide drill that was coated with Titanium Nitride (TiN). The drilling procedure entailed the creation of perforations throughout the material, extending from one end to the other under dry condition. The study utilized three discrete sets of cutting speeds (60, 70, 80 m/min) and three different feed rates (0.06, 0.09, 0.12 mm/rev). The data collected encompassed the experimental outcomes, specifically the measurements of thrust force, surface roughness (SR), and delamination factor (F_d).

2 Material and methods

2.1 Production of the composite

The GFRP composites employed in the experiments were produced using the pultrusion method. This involved preheating uni-directional multi-end continuous glass rovings weighing 600 Gram per Square Meter (GSM), composed of E-glass fibers. These rovings were then pulled by a puller and drawn into the melt impregnated epoxy reinforcement at a velocity of 100 m/s. Subsequently, the composite material was cooled utilizing a die, thereby imparting the ultimate form and dimensions. Subsequently, the fabricated composite material was divided into the desired lengths through the utilization of a pelletizing system.

Pultruded solid composite was manufactured with high-volume fraction of fibers, specifically 60%, to enhance its resistance to variations in cutting speeds and feed rates during drilling experiments. The composite exhibited fiber orientation of 90° indicating that the fibers were positioned perpendicular to feed direction. The rectangular shaped composite used for drilling operations had the dimensions of 60x190x25 mm. The illustration of the composite workpiece was given in Figure 1. Additionally, the microstructures of the composite material are shown in Figure 2.

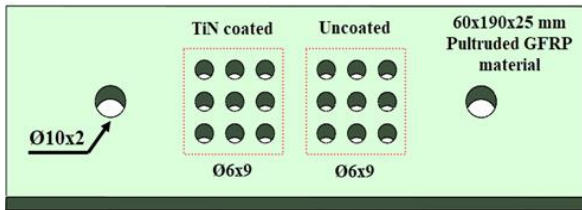


Figure 1. Illustration of pultruded composite workpiece and related hole diameters

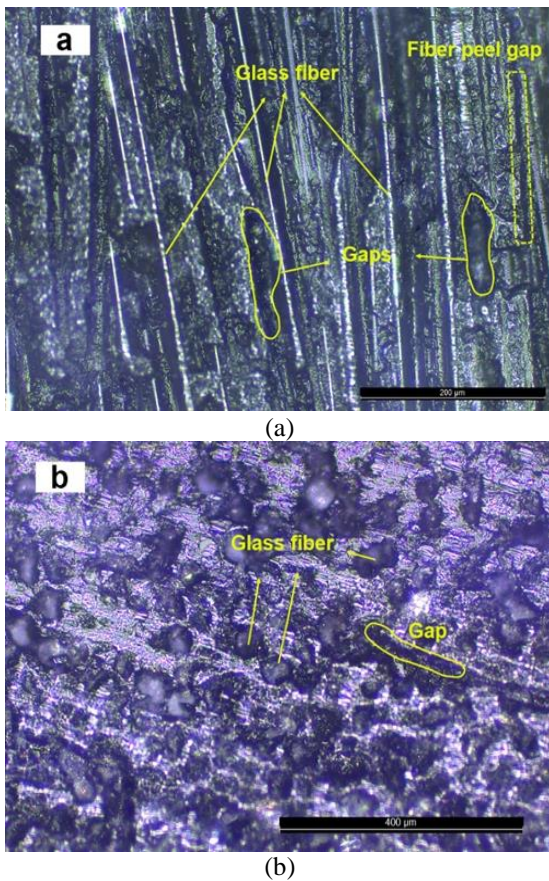


Figure 2. Microstructures of the composite material, (a) parallel view to glass fibers, (b) perpendicular view of glass fibers

2.2 Specifications of drill bits

The experiments employed two types of drill bits: an uncoated solid carbide drill bit and a titanium nitride (TiN) coated solid carbide drill bit. Both drills were acquired from the Karcan Cutting Tools company and shared common

specifications, including a diameter of 6 mm and a tip angle of 118°. Table 1 displayed the specifications of the drill utilized in the experimental procedures.

Table 1. Illustration of the drill's employed in the experiments

Helix angle	30°	30°
Coating type	TiN	Uncoated
Point angle	118°	118°
Coating thickness	0.25-1.2 Micron	-
Coating method	PVD	-
Coating melting Temperature	2950 °C	-

The TAKUMA brand JVH710 CNC vertical machining center, which is under the maintenance of Amasya University, was utilized for conducting experiments. The experiments employed a bench and a test set, as depicted in Figure 2. The adjustment of drilling factors was based on the specifications provided in the cutting tool catalog and the findings obtained from relevant literature. The drilling operation was conducted at a cutting depth of 25 mm, employing three distinct cutting speeds (60, 70, and 80 m/min) and three feed rates (0.06, 0.09, 0.12 mm/rev). The cutting parameters employed for hole drilling are presented in Table 2.

Table 2. Drilling factors and factor levels

Factors	Unit	Code	Factor levels		
Cutting speed (Vc)	m/min	B	60	70	80
Feed rate (f)	mm/min	C	0.06	0.09	0.12

2.3 Thrust force

The measurement of thrust forces during the drilling process was conducted using a S type load cell manufactured by Puls Elektronik as given in Figure 3. The Newton (N) is the accepted unit for expressing values of thrust force. Given that the study also involved the calculation of delamination factors at the hole entrance, the experiments were conducted without replication.

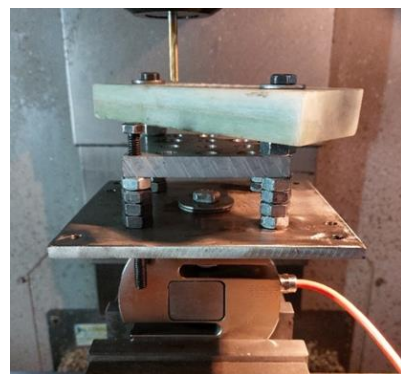


Figure 3. Thrust force measurement setup for drilling

2.4 Surface roughness measurements

The measurements of surface roughness (SR) were carried out using a Mitutoyo surface roughness measuring device. The drilled holes were bisected, and measurements were obtained from the interior hole surface.

Similar to the approach taken in the determination of thrust force, the measurements were carried out without replication owing to the consideration of delamination factors at the hole entrances.

2.5 Delamination factor (F_d)

Minimizing delamination damages at the entrances of holes is significant in the context of working with GFRP materials. In instances where there are significant delamination damages present, the progressive nature of the damage inhibits the material's ability to effectively carry out its intended function, resulting in a shortened lifespan.

The calculation of the delamination factor on the surfaces of hole entrances is determined using Equation 1 as;

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (1)$$

where, F_d is the delamination factor; D_{max} indicates the maximum damage diameter at the hole entrance and D indicates the drilling diameter [16].

The measurement of the maximum damage diameter was done to determine the delamination factors. Images capturing the hole entrances were acquired during the experimental procedures, and subsequently, the maximum diameters of deformation were determined through the utilization of computer-aided design (CAD) software. The images underwent a conversion process, resulting in the transformation of the images into negatives. Consequently, the damage to the entrances of the holes became more pronounced and apparent as depicted for experiment no: 16 in Figure 4.

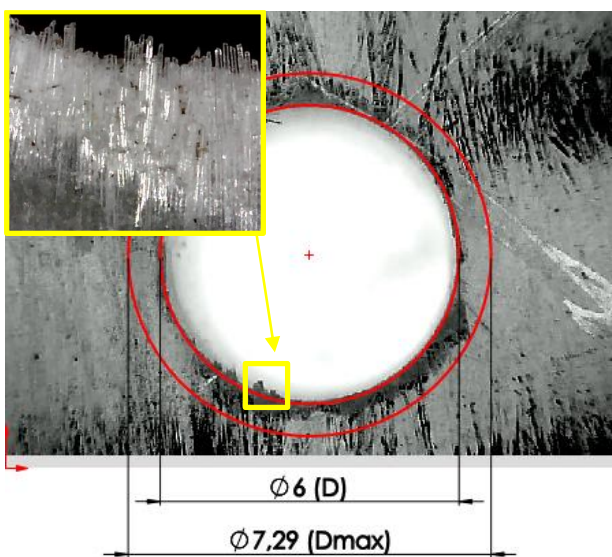


Figure 4. Delamination factor measurement for experiment no: 16

3 Results and discussion

The experimental procedure involved the implementation of cutting parameters in a total of 18 trials. The measurement of maximum thrust forces was obtained. Following the conclusion of the drilling operations, the surface roughness (SR) of the hole surfaces and the delamination factors at the hole entrances were measured. The delamination factors were computed for each experiment based on the maximum delamination measurements observed at the conclusion of the drilling procedures. Table 3 presents the experimental data pertaining to the surface roughness (SR), delamination factors (F_d), and thrust forces.

Table 3. Experimental measurements of SR, F_d , and thrust force values

Exp. No	A	B	C	SR	D_{max} (mm)	F_d (Delamination Factor)	Thrust Force
E1	Coated	60	0.06	3.12	7.72	1.31	33.1
E2	Coated	60	0.09	3.98	8.59	1.43	51.2
E3	Coated	60	0.12	4.65	8.86	1.54	61.2
E4	Coated	70	0.06	2.84	7.77	1.29	27.8
E5	Coated	70	0.09	3.62	8.2	1.37	33.1
E6	Coated	70	0.12	4.11	9.26	1.48	49.78
E7	Coated	80	0.06	3.21	7.66	1.28	23.4
E8	Coated	80	0.09	3.58	7.75	1.29	28.2
E9	Coated	80	0.12	3.77	8.71	1.45	38.1
E10	Uncoated	60	0.06	2.93	8.93	1.49	46.9
E11	Uncoated	60	0.09	4.62	8.66	1.55	64.4
E12	Uncoated	60	0.12	5.33	7.63	1.64	96.9
E13	Uncoated	70	0.06	2.81	7.59	1.34	39.3
E14	Uncoated	70	0.09	4.22	8.47	1.48	57.2
E15	Uncoated	70	0.12	5.32	7.82	1.51	67.4
E16	Uncoated	80	0.06	3.13	7.29	1.22	33.6
E17	Uncoated	80	0.09	3.51	9.27	1.41	40.2
E18	Uncoated	80	0.12	4.03	9.81	1.43	54.8

3.1 Thrust force results

Figure 5 presents the thrust force outcomes for two distinct types of drill bits operating under various cutting conditions.

As depicted in Figure 5, the thrust values exhibited a positive correlation with the feed rate values for both drill bits. In contrast, an rise in cutting speed led to a fall in thrust forces. This result was a predictable outcome that had been previously documented in the existing body of literature. The elevation in speed provided a rise of temperature between the contacting areas of drill bit and composite surfaces. The heat generated due to this contact causes an elevation of temperature in the surrounding area, which subsequently affects the material behavior of the matrix resin. The matrix resin undergoes a transition from a glassy state to an elastic state, resulting in a softening of the contacted area and a subsequent reduction in the thrust force [17, 18]. However, it should be noted that slower cutting velocities result in colder surface contact areas, which hinders heat generation. Therefore, the composite material exhibited increased resistance to drilling deformation at lower cutting speed values, leading to the generation of higher thrust forces [19, 20].

Furthermore, the feed rate values, and the magnitude of the thrust force values were observed to be closely related.

Shear area of the drill bit and its increase can be attributed to this phenomenon. When conducting drilling operations at elevated feed rates, the self-generated feed angle experiences an elevation, resulting in the drop of the angle of effective clearance. This circumstance leads to the occurrence of uncut fibers, subsequently facilitating the flow of chips more challenging due to the polymer's softening. As a result, the challenges experienced during the process of chip evacuation resulted in a subsequent augmentation of the thrust force [13, 21].

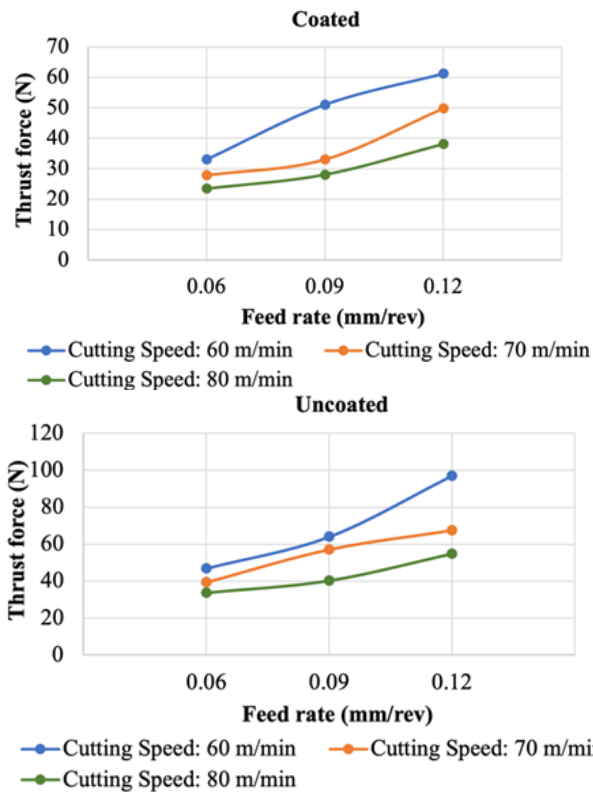


Figure 5. Thrust force values under different cutting conditions for coated and uncoated drill bits

The disparity of the values of thrust force between solid carbide and TiN drill bits can also be explained by the heat generation and subsequent temperature increase observed during the drilling process. As mentioned earlier, a rise in temperature induces a transformation of the matrix resin from a solid, glassy phase to a more flexible, elastic phase. However, if the temperature continues to rise, the matrix resin undergoes a phase transition to a viscous-flow state. This transition results in a splitting or detachment of the fibers from the matrix resin, accompanied by an adhesive-style deformation of the polymeric material during the contact of the drilling bit [22, 23]. Higher contact temperatures have effect on the thrust force. The utilization of TiN coated solid carbide drills offers several advantages over uncoated solid carbide drills, including increased hardness, enhanced wear resistance, reduction in thermal conduction, and improved rate of heat dissipation. Due to the heat generation capabilities, noticeable disparities in thrust forces were observed between the two types of drills.

The chip formations observed subsequent to the drilling procedure were presented in Figure 6. As previously stated, the size and continuity of chip formations exhibited a rising pattern as the feed rate increased.

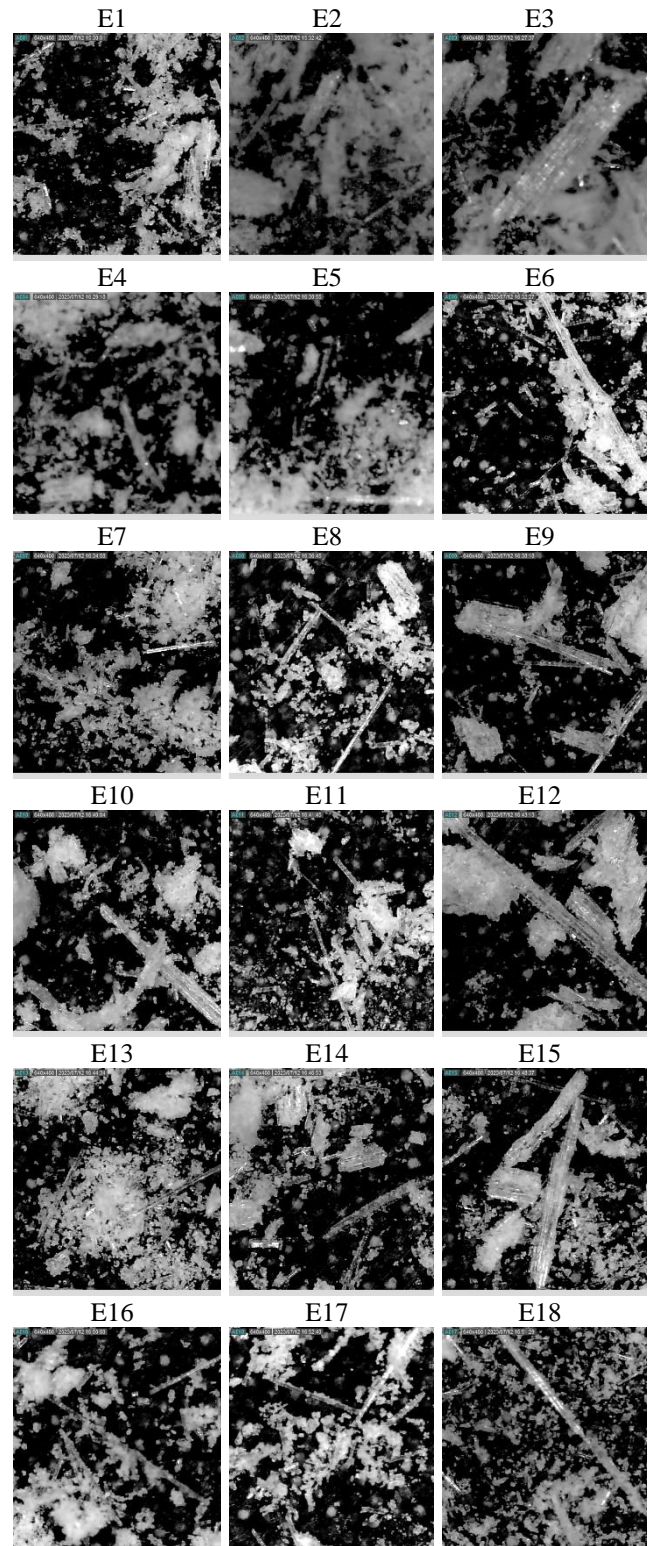


Figure 6. Images of chip formations in relation to conducted experiments

3.2 Delamination factor (F_d) results

Upon conducting drilling on the specimens, the presence of delamination damage was observed at the surface of the samples. Drilling provided an external force that can separate neighboring plies near the drill's entry. Measured delamination factors were given in Figure 7.

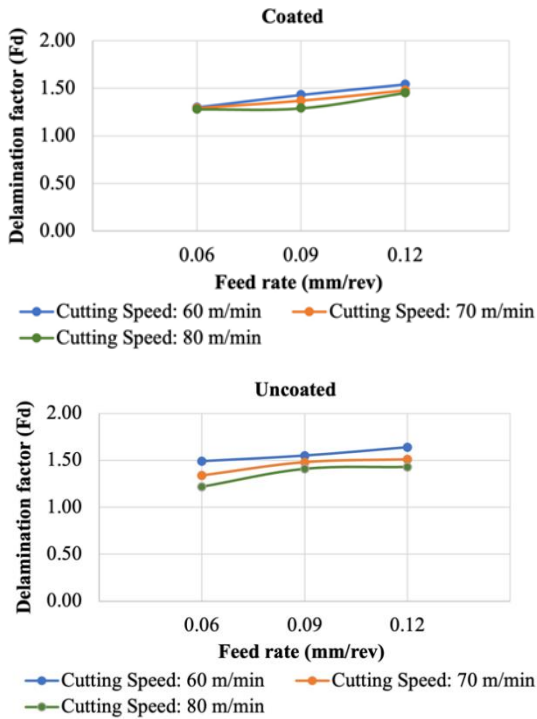


Figure 7. Delamination factor values under different cutting conditions for coated and uncoated drill bits

The analysis of the observed delamination damage suggested that the delamination caused by drilling is positively correlated with the feed rate, while it exhibits a negative correlation with the cutting speed. Furthermore, it was noted that the impact of cutting speed on delamination was comparatively less significant in comparison to the effect of feed rate. This phenomenon may be correlated with the escalation of axial thrust force as the feed rate increases. [24].

Additionally, that the utilization of TiN drill bits resulted in a slightly reduced occurrence of F_d as depicted in Figure 7. The likely cause of this situation can be attributed to the reduced heat generation and temperature increase between the tool and matrix.

The utilization of an uncoated solid carbide drill has the potential to generate elevated levels of heat, which may reach a critical threshold leading to adhesive-induced deformation. Consequently, this phenomenon can result in an increased occurrence of delamination damage [15].

3.3 Surface roughness (SR) results

The output of cutting parameters and tool performance that holds the highest significance is surface roughness. The operational effectiveness and mechanical properties of a set

of components involving pins, bolts, and screws are influenced by SR values of the holes. The measured SR values were given in Figure 8.

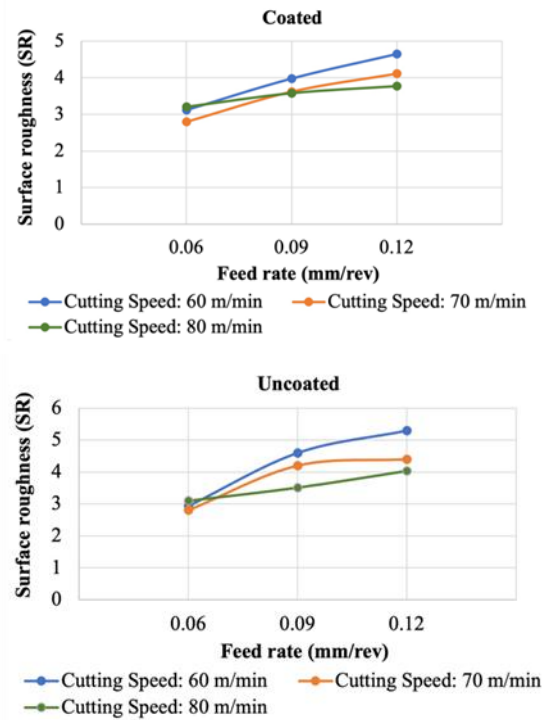


Figure 8. SR measurements obtained from distinct cutting conditions in relation to both coated and uncoated drill bits

The examination of Figure 8 has demonstrated that the feed rate had effects on the measurements of SR. The rationale behind this phenomenon is that at elevated feed rates, the propagation of cracks becomes more severe and less manageable because of the increased strain rate [25, 26]. The results presented in Figure 8 demonstrate a modest reduction in SR measurements with an increase in cutting speed. The observed phenomenon can be ascribed to the thermal-induced reduction in the rigidity of the matrix resin. Nevertheless, it was apparent that the rate at which the material was fed had an additional impact on the roughness of the surface in comparison to the influence exerted by the speed at which the cutting process was carried out. The utilization of TiN coating on solid carbide drill bit yielded superior surface roughness outcomes in comparison to uncoated solid carbide drill bit. The SR values were observed to be the lowest when employing a moderate cutting speed of 70 m/min and a feed rate of 0.06 mm/rev.

4 Conclusion

The pultrusion method was employed to manufacture a GFRP composite with 25 mm thickness, high-volume fraction of fibers (60%), and fiber orientation of 90°. Then the drilling process was performed using an uncoated solid carbide drill and a solid carbide drill coated with Titanium Nitride (TiN). The drilling process involved the formation of perforations across the material, spanning from one end to

the other while maintaining a dry environment. The research employed three distinct sets of cutting speeds (60, 70, 80 m/min) and three varying feed rates (0.06, 0.09, 0.12 mm/rev). The findings are below;

- Feed rate values and thrust force values had a positive correlation for both TiN coated and uncoated drill bits. The study found that there was a negative relationship between cutting speed and thrust forces. In particular, as the cutting speed was increased, there was a corresponding reduction in the magnitude of the thrust forces. The rise in speed led to a temperature increase in the contacting regions of the drill bit and the drilled surface of the GFRP composite. The drilling process generated heat that resulted in elevated temperatures in the surrounding region. These increased temperatures had an impact on the matrix resin and its mechanical properties.
- The examination of the observed delamination damage indicated a positive correlation between the delamination caused by drilling and the feed rate, while a negative correlation was observed with the cutting speed. Moreover, it was observed that the influence of cutting speed on F_d was relatively less pronounced in comparison to the impact of feed rate.
- The feed rate profoundly impacted the SR measurements. The outcomes of the study revealed a modest decrease in surface roughness measurements at elevated cutting speeds. Nevertheless, it was apparent that the feed rate exerted a more pronounced effect on SR in comparison to the influence of cutting speed.
- The utilization of TiN-coated solid carbide drills has demonstrated better results in terms of thrust force, F_d , and SR than uncoated solid carbide drills. This reason of this situation is the increased hardness, enhanced wear resistance, reduced thermal conductivity, and improved heat dissipation rate provided by the TiN coating.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest related to the study, including financial, personal, or professional relationships and affiliations.

Similarity rate (iThenticate): %16

References

- [1] T. Lukács, C. Pereszlai and N. Geier, Delamination measurement in glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite based on image differencing. *Composites Part B: Engineering*, 248, 110381, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110381>
- [2] B. V. Kavadi, A. B. Pandey, M. V. Tadavi and H. C. Jakharia, A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic. *Procedia Technology*, 14, 457-464, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.058>
- [3] M. Kashikar, S. M. Patil and S. Kalkar, Experimental Study of Influence of Drilling Parameters on Delamination in Drilling Aircraft CFRP Composites Using DOE (Taguchi Method). *Optimization of Industrial Systems*, 499-518, 2022. <https://doi.org/10.1002/9781119755074.ch39>
- [4] G. Kumar, S. M. Rangappa, S. Siengchin and S. Zafar, A review of recent advancements in drilling of fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part C: Open Access*, 100312, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100312>
- [5] D. Geng, Y. Liu, Z. Shao, Z. Lu, J. Cai, X. Li... and D. Zhang, Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Composite Structures*, 216, 168-186, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>
- [6] A. Dhandapani, S. Krishnasamy, R. Nagarajan, A. D. A. Selvaraj, S. M. K. Thiagamani, C. Muthukumar... and S. O. Ismail, Investigation of wear behavior in self-lubricating ABS polymer composites reinforced with glass fiber/ABS and glass fiber/carbon fiber/ABS hybrid. *Lubricants*, 11(3), 131, 2023. <https://doi.org/10.3390/lubricants11030131>
- [7] E. Kilickap, Y. H. Çelik and B. Yenigun, Experimental Evaluation of Parameters Affecting Delamination Factor, Tensile Strength, Thrust Force And Surface Roughness In Drilling Of Gfrp. *Surface Review and Letters*, 30 (04), 2350025, 2023. <https://doi.org/10.1142/S0218625X23500257>
- [8] V. Chadha, S. Gupta, R. M. Singari, Optimization of Cutting Parameters on Delamination Using Taguchi Method during Drilling of GFRP Composites. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2, Hong Kong, 2017.
- [9] R. A. Kishore, R. Tiwari, A. Divedi and I. Singh, Taguchi analysis of the residual tensile strength after drilling in glass fiber reinforced epoxy composites. *Materials and design*, 30 (6), 2186-2190, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.035>
- [10] N. S. Mohan, A. Ramachandra and S. M. Kulkarni, Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites. *Composite structures*, 71 (3-4), 407-413, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.039>
- [11] K. Shunmugesh, K. T. Akhil, S. Aravind and M. Pramodkumar, Optimization of drilling characteristics using grey-fuzzy logic in glass fiber reinforced polymer (GFRP). *Materials Today: Proceedings*, 4 (8), 8938-8947, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.245>
- [12] R. Bhat, N. Mohan, S. Sharma, D. Pai and S. Kulkarni, Multiple response optimisation of process parameters during drilling of GFRP composite with a solid carbide twist drill. *Materials Today: Proceedings*, 28, 2039-2046, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.384>
- [13] U. A. Khashaba, M. S. Abd-Elwahed, M. A. Eltaher, I. Najjar, A. Melaibari and K. I. Ahmed, Thermo-mechanical and delamination properties in drilling gfrp composites by various drill angles. *Polymers*, 13 (11), 1884, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13111884>
- [14] A. T. Erturk, F. Vatanserver, E. Yazar, E. A. Guven and T. Sinmazcelik, Effects of cutting temperature and

- process optimization in drilling of GFRP composites. *Journal of Composite Materials*, 55 (2), 235-249, 2021. <https://doi.org/10.1177/00219983209471>
- [15] J. C. Rubio, A. M. Abrao, P. E. Faria, A. E. Correia and J. P. Davim, Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (6), 715-720, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.015>
- [16] K. Palanikumar, Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites. *Measurement*, 44 (10), 2138-2148, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.023>
- [17] M. Ramesh and A. Gopinath, Measurement and analysis of thrust force in drilling sisal-glass fiber reinforced polymer composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 197, 012056, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/197/1/012056>
- [18] A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães, J. F. Silva and J. M. R. Tavares, Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill. *Composites Science and Technology*, 69 (14), 2376-2382, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.025>
- [19] B. O. P. Soepangkat, R. Norcahyo, M. K. Effendi and B. Pramujati, Multi-response optimization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) drilling using back propagation neural network-particle swarm optimization (BPNN-PSO). *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23 (3), 700-713, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.10.002>
- [20] S. R. Lu, C. Wei, J. H. Yu, X. W. Yang and Y. M. Jiang, Preparation and characterization of epoxy nanocomposites by using PEO-grafted silica particles as modifier. *Journal of materials science*, 42 (16), 6708-6715, 2007.
- [21] A. Lotfi, H. Li and D. V. Dao, Machinability analysis in drilling flax fiber-reinforced polylactic acid bio-composite laminates. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 13(9), 443-447, 2019.
- [22] S. Dutta and S. K. R. Narala, Optimizing turning parameters in the machining of AM alloy using Taguchi methodology. *Measurement*, 169, 108340, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108340>
- [23] J. Xu, C. Li, M. El Mansori, G. Liu and M. Chen, Study on the frictional heat at tool-work interface when drilling CFRP composites. *Procedia Manufacturing*, 26, 415-423, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.049>
- [24] A. Lotfi, H. Li and D. V. Dao, Machinability analysis in drilling flax fiber-reinforced polylactic acid bio-composite laminates. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 13 (9), 443-447, 2019.
- [25] K. Palanikumar, Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology. *Materials and design*, 28 (10), 2611-2618, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.001>
- [26] H. Yaka, Measurement of Surface Quality and Optimization of Cutting Parameters in Slot Milling of Gfrp Composite Materials with Different Fiber Ratios Produced by Pultrusion Method. *Surface Review and Letters*, 28 (10), 2150095, 2021. <https://doi.org/10.1142/S0218625X21500955>





Elektriksel ve kimyasal kuplajlı izhikevich nöron modelinin geri adımlamalı kontrol yöntemi ile senkronizasyonu

Synchronization of electrically and chemically coupled izhikevich neuron model via backstepping control method

Zühra Karaca^{1,*} , Nimet Korkmaz² , Recai Kılıç³ 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Kayseri Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri Türkiye

Öz

Bu çalışmada, elektriksel ve kimyasal kuplajlı iki Izhikevich nöron modelinin geri adımlamalı kontrol yöntemi kullanılarak senkronizasyonu ele alınmıştır. Literatürde elektriksel olarak kuplajlanan Izhikevich nöron modeliyle yapılan çalışma sayısı fazlayken, kimyasal kuplaj ile oluşturulan yapıya ait çalışmalar sınırlıdır ve çift yönlü kimyasal olarak kuplajlanan Izhikevich nöron modelinin geri adımlamalı kontrol yöntemi kullanılarak senkronizasyonu ilk defa bu çalışmada ele alınmıştır. Geri adımlamalı kontrol yönteminin uygulandığı sistemin, kuplajlama ağırlığından bağımsız bir şekilde eş zamanlı olarak ateşlendiği, hem standart sapma analizi ile hem de simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Izhikevich nöron modeli, Senkronizasyon, Geri adımlamalı kontrol yöntemi, Kimyasal kuplaj.

1 Giriş

Biyolojik nöron modelleri, sinir sistemindeki belirli hücrelerin, hücre zarları boyunca aksiyon potansiyelleri veya ani yükselmeler olarak adlandırılan elektriksel potansiyellerinin matematiksel tanımlarıdır. Nöronlar, impulsları elektriksel veya kimyasal iletim yoluyla ileterek, canlılarda bilgi taşıma işlemini üstlenmektedir.

Nöronlar arasındaki kuplajlama türü ya elektriksel ya da kimyasal olmaktadır ve bu kuplajlamalar beyinde bilgi işlemenin temelini oluşturmaktadır. Kimyasal sinapslarda bilginin aktarılması için iki hücre arasında nörotransmitter adı verilen bir madde salgılanırken, elektriksel sinapsta, iki hücre arasında boşluk bağlantıları bilgi aktarılmasına aracılık etmektedir [1]. Hesaplamalı sinirbilimde, nörolojik bozuklukları ve altında yatan sebepleri araştırmak, beynin nasıl çalıştığını anlamak, nöronları modelleyebilmek, nöronlar arasındaki iletişimlerini anlayabilmek ve nöronların patlama davranışlarını simule edebilmek amacıyla literatürde biyolojik nöron modelleri tanımlanmıştır. Hodgkin-Huxley (HH)[2], Wilson-Cowan (WC) [3], FitzHugh-Nagumo (FHN) [4], Morris-Lecar (ML) [5], Hindmarsh-Rose (HR) [6] ve Izhikevich [7] gibi nöron

Abstract

This study addresses the synchronization of two Izhikevich neuron models, coupled electrically and chemically, using the backstepping control method. While there are numerous studies in the literature regarding the electrical coupling of Izhikevich neuron models, research on synchronization of structures created through chemical coupling is limited. This study is the first to tackle the synchronization of a bidirectionally chemically coupled Izhikevich neuron model using the backstepping control method. The system subjected to the backstepping control method was observed to trigger synchronization independently of the coupling weight. This observation is confirmed through both standard deviation analysis and simulation results.

Keywords: Izhikevich neuron model, Synchronization, Backstepping control method, Chemically coupling.

modelleri literatürde sıklıkla incelenen ve diferansiyel denklemlerle ifade edilebilen nöronal ağ yapılarıdır.

Izhikevich nöron modeli, nöron davranışlarından çoğalma ve patlama davranışını yeniden üretebilmektedir. Ayrıca nöron davranışlarını iyi bir şekilde sergileyebilen Hodgkin-Huxley nöron modelinin biyolojik olarak uygunluğu ve nöron modelleri arasında basit, hesaba dayalı olan ve nöronal sistemlerde sıklıkla kullanılan Integrate-and-Fire nöron modelinin hesaplama etkinliği Izhikevich nöron modeli ile birleştirilebilmektedir. Izhikevich [7] tarafından yapılan çalışmada, Izhikevich nöron modelinin parametreleri ayarlanarak, nöronların, ani yükselme, patlama ve karma mod ateşleme kalıpları gibi davranışları yeniden üretebildiği gösterilmiştir.

Canlı beynindeki nöronlar arasındaki gerçek etkileşimi belirlemek çok zor olduğundan nöronal modellerin senkronizasyonu, nöral sinyal işlemede önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca senkronizasyon süreci beynin bilgi işleminde kritik bir role sahiptir ve bu süreç bireysel nöronlarla değil, kolektif nöronların işbirliği ile gerçekleştiği ortaya çıkmıştır. Kolektif nöronlar arasındaki bir dengesizlik durumu ise şizofreni, epilepsi gibi birçok klinik hastalığa sebep olmaktadır. Bu nedenle nöronların senkronizasyonu, sinirbilimi için önemli çalışmalardan biri haline gelmiştir [8,

* Sorumlu yazar / Zühra KARACA, e-posta / e-mail: zuhra.karaca@ohu.edu.tr

Geliş / Received: 09.08.2023 Kabul / Accepted: 20.09.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1340148

9]. Literatürde de nöronların senkronizasyon konusu ile ilgili yapılan çalışmalar genellikle sinaptik eşleşme türleri, senkronizasyon türleri, senkronizasyonun kontrolü ve nöron modellerinin pratik uygulamalarda kullanımı gibi başlıklar altında toplanmaktadır [10].

İki nöron sistemi elektriksel veya kimyasal olarak kuplajlanarak birleştirilebilir. Kuplajlanan nöronlar arasındaki senkronizasyon, geri beslemeli kontrol yöntemi, kayan kipli kontrol yöntemi, geri adımlamalı kontrol yöntemi gibi çeşitli kontrol metotları ile kontrol edilebilir. İki nöron arasındaki senkronizasyon düzeyi ise özdeğer yaklaşımı, lineer matris eşitsizlik yöntemi, ana kararlılık fonksiyonu, standart sapma yöntemi, ortalama mutlak hata yöntemi gibi çeşitli yaklaşımlarla belirlenebilir [11-14].

Harici akımlarla uyarılan kuplajlı iki nöronun eşzamanlı dinamik davranışlar sergileyebilmesi için geri adımlamalı kontrol yöntemi (GAKY) kullanılabilir [15]. GAKY kullanılarak, eş zamanlı davranış göstermeyen iki sistem eş zamanlı hale getirilebilir ve bunun için sadece bir kontrolöre ihtiyaç duyulmaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerin harici uyarım tanımlaması içerip içermediğine bakılmaksızın pek çok sisteme uygulanabilmektedir. Geri adımlamalı kontrol yöntemindeki temel fikir, tüm sistemdeki tasarım problemini bir dizi alt probleme bölmek ve Lyapunov kontrol fonksiyonu ile kontrol yasalarını elde etmek ve bunları yinelemeli olarak yapabilmektir [16-18]. Bu yinelemeli süreç, nihai kontrolör elde edilinceye kadar devam etmektedir. Bu kontrolör ile sistemin asimptotik kararlılığı garanti edilmektedir ve nöronların davranışı eş zamanlı hale getirilebilmektedir [19].

Bu çalışmada zengin dinamiklere ve hesaplama kolaylığına sahip Izhikevich nöron modeli ele alınmaktadır. Izhikevich nöron modeli elektriksel ve kimyasal olarak kuplajlanarak, literatürde, sınırlı sayıda bulunan kimyasal olarak kuplajlanan nöronların senkronizasyon konusuna katkıda bulunmak amaçlanmaktadır [20]. Çalışmada ilk olarak Lyapunov üstelleri verilerek, Izhikevich nöron modelinin kaotik davranış sergileme yeteneği gösterilmek istenmektedir. Bunun için sinaptik akımı temsil eden 'I' nin değeri, nöron modelinin kaotik davranış sergilediği 'I=-99' olarak alınmıştır ve nörona ait zaman alanı ve faz düzlemi sonuçları verilmiştir. Çalışmanın devamında iki adet sinir hücresine kontrol metodu uygulamadan sadece kuplajlanmıştır. Kuplajlama için hem elektriksel hem de kimyasal kuplaj kullanılarak nöronlar birbirine bağlanmıştır. Hem elektriksel hem de kimyasal olarak kuplajlanan nöronların, kuplajlama ağırlığının değişimine bağlı olarak hücre zarı potansiyellerinin nasıl değiştiği ve kuplajlı iki nöronun hücre zarlarının potansiyellerinin arasındaki standart sapma sonuçları verilmiştir. Sonrasında elektriksel ve kimyasal kuplajlı iki Izhikevich nöron modeline ilk defa bu çalışmada geri adımlamalı kontrol yöntemi uygulanarak sistem eş zamanlı hale getirilmiştir. Geri adımlamalı kontrol yöntemi ile eş zamanlı hale getirilen sistemin grafikleri Bölüm 3'te verilmiştir.

2 Izhikevich nöron modeli

Izhikevich nöron modeli, gerçek nöronların ateşleme dinamiklerini gözlemleme yeteneğini sunan ve biyolojik

nöronların simülasyonları alanında diğer biyolojik nöron modelleriyle birlikte yaygın olarak kullanılan ve gerçek zamanlı uygulamalar için literatürde sıklıkla incelenen bir biyolojik nöron modelidir [7, 21].

Izhikevich nöron modeline ait denklemler aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \\ \dot{u} &= a(bv - u) \\ v &\geq 30mV \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemlerde her bir parametre nörona ait bir durumu tanımlamaktadır. Denklemlerde yer alan 'v' parametresi membrane ait potansiyeli ifade ederken, sodyum (Na+) iyonunun geri kazanımı 'u' parametresi ile, hücre zarındaki harici akımlar ise 'I' parametresi ile ifade edilmektedir. Denklemlerdeki diğer parametrelerden 'a' parametresiyle, 'u' parametresine ait zaman ölçeğinin iyileştirme değişkeni tanımlanmaktadır. 'b' parametresiyle, 'u' parametresinin duyarlılığı ifade edilmektedir. Denklemlerdeki 'c' parametresi ile 'v' nin ani yükselme sonrası sıfırlama durumu tanımlanırken, 'd' parametresiyle de 'u' nun ani yükselmesi sonrasında sıfırlama durumu tanımlanmaktadır [7, 22]. Çalışmada Izhikevich nöron modelinin kaotik davranışını gözlemleyebilmek için parametre değerleri; a=0.2, b=2, c=-55, d=-16 [7] alınarak simülasyon sonuçları verilmektedir. Izhikevich nöron modelinin harici DC akım parametresi 'I' nin değerlerine göre kaotik davranış sergileme durumu Lyapunov üstelleri vasıtasıyla gözlemlenebilmektedir. Sistemin kaotik davranış sergilediğinin göstergesi ise bu üstellerden en az birinin pozitif bir değere sahip olmasıdır. Bunun için [Denklemler](#) 2'de verilen doğrusal olmayan modeller için kullanılan Lyapunov üstelleri adlı yöntem kullanılmıştır [23]. Lyapunov üstelleri yöntemi kullanırken söz konusu sistemin analizi için, [Denklemler](#) 3'te verilen Jacobian matrisinin kullanılması gerekmektedir.

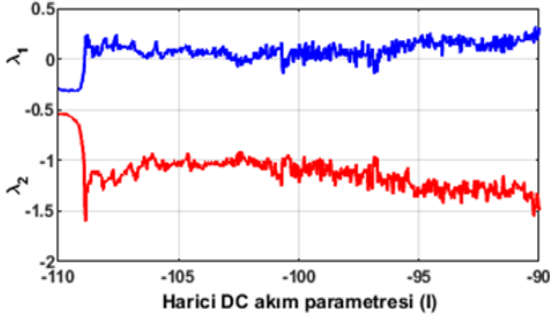
$$= \frac{1}{k} (\ln|f'_c(v_1)| + \ln|f'_c(v_2)| + \dots + \ln|f'_c(v_k)|) \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} 0.08v + 5 & -1 \\ ab & -a \end{bmatrix} \quad (3)$$

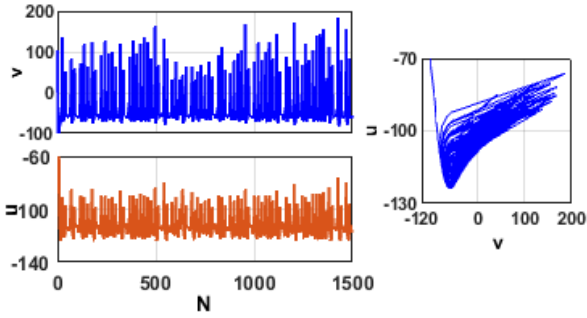
Yukarıdaki denklemlerde f'_c , 'v' parametresine bağlı olarak değişimleri gösterirken, v'_1, v'_2, \dots, v'_k parametreleri ise iterasyonları göstermektedir.

Izhikevich nöron modelinde I parametresinin farklı değerleri için, [-110, -90] aralığında Lyapunov üstelleri hesaplatılmıştır. Modele ait Lyapunov üstelleri [Şekil 1](#)'de verilmektedir.

[Şekil 1](#)'de, I=-99 değerinde üstellerden biri pozitif bir değere sahip olduğundan model kaotik bir davranış sergilemektedir. Modelin sergilediği kaotik davranışa ait simülasyon sonuçları ise [Şekil 2](#)'de verilmektedir.



Şekil 1. Kuplajsız Izhikevich nöron modelinin Lyapunov üstelleri



Şekil 2. Izhikevich nöron modeline ait kaotik davranışını gösteren zaman alanı ve faz düzlemi grafikleri

2.1 İki Izhikevich nöron modelinin elektriksel kuplajla kuplajlanması

Nöronlar arasında gerçekleşen etkileşimler, sinaps olarak adlandırılan ve anatomik tanıma sahip hücrelerde meydana gelmektedir. Sinaptik iletim konusunda literatürde geniş bir araştırma alanı bulunmasına rağmen, şu anda iki temel yöntem sinaptik iletim için kabul edilmektedir ve bunlar elektriksel ve kimyasal sinapstır. İki nöron arasında gerçekleşen bir uyartım geçişini nörotransmitter madde ile gerçekleştiriyorsa buna 'kimyasal sinaps', elektriksel olarak gerçekleştiriyorsa buna 'elektriksel sinaps' adı verilmektedir.

İki Izhikevich nöron modelinin elektriksel olarak kuplajlandığı modele ait matematiksel ifade Denklem (4)'te verilmektedir.

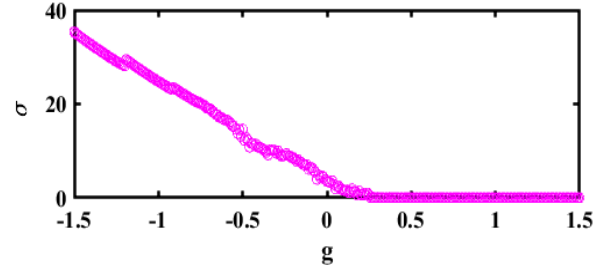
$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= 0.04v_i^2 + 5v_i + 140 - u_i + I - I_j^{elect} \\ I_j^{elect} &= g \sum_{i \neq j, j=1}^{KN} v_i - v_j \\ \dot{u}_i &= a(bv_i - u_i) \\ v_i &\geq 30mV \begin{cases} v_i \leftarrow c \\ u_i \leftarrow u_i + d \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Denklemdaki 'g' kuplajlama parametresi, kuplajlı nöronlar arasında gerçekleşen sinyal iletim oranıdır ve sinaptik kuplajlama ağırlığı olarak adlandırılmaktadır. Denklemden yer alan 'i' ve 'j' parametrelerinin değerleri 1,2'dir. Yine burada, 'v₁' birinci nöronun, 'v₂' ikinci nöronun hücre zarı potansiyellerini ifade etmektedir. Denklem 4'te 'KN' ile gösterilen kuplajlı nöronlar, parametre

değerlerine bağlı olarak eş zamanlı ya da eş zamansız ateşlenebilir. İki Izhikevich nöronunun elektriksel olarak kuplajlandığı simülasyon sonuçları kuplajlama parametresi 'g'nin sırasıyla -0.4 ve 0.4 değerleri için Şekil 4a ve 4b'de verilmektedir

Kuplajlı iki Izhikevich nöronuna ait hata durum denklemleri Denklem 5'te verilmektedir.

$$\begin{aligned} e_v &= v_1 - v_2 \\ e_u &= u_1 - u_2 \end{aligned} \quad (5)$$



Şekil 3. Elektriksel kuplajlı iki Izhikevich nöronunun standart sapma sonucu

Şekil 3'de kuplajlanmış nöronların eş zamansız ve eş zamanlı ateşlemeleri gözlemleyebilmek için standart sapma sonuçları verilmiştir. Standart sapma sonucunun sıfıra yakınsaması nöronların aynı anda ateşlendiğini, aksi takdirde, nöronların aynı anda ateşlenmediğini göstermektedir. Elektriksel kuplajlı Izhikevich nöron modelinde, g>0.25 değerlerinde standart sapma sonuçları yaklaşık olarak sıfıra yakınsamakta ve sistem eş zamanlı hale gelmektedir.

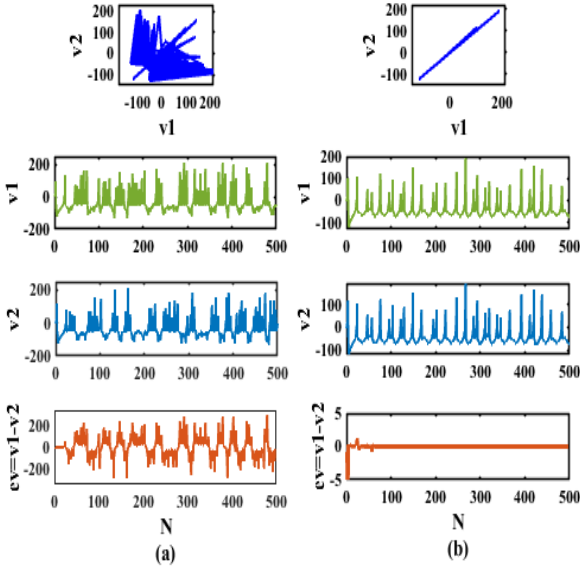
Şekil 4'te kuplajlama ağırlığının 0,4 ve -0,4 değerleri için simülasyon sonuçları verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi sistem standart sapma sonuçlarına uygun olarak g=0.4 değerinde eş zamanlı olarak ateşlenirken g=-0.4 değerinde eş zamansız ateşlenmektedir. Nöronların eş zamanlı davranış gösterdiklerini gözlemlemek için sistemin zar potansiyelleri arasındaki fark sinyalleri 'ev' şekillerde verilmektedir.

2.2 İki Izhikevich nöron modelinin kimyasal kuplajla kuplajlanması

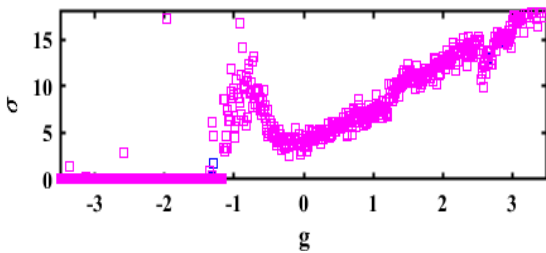
Kimyasal kuplajlı iki Izhikevich nöron modelinin denklemleri aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= 0.04v_i^2 + 5v_i + 140 - u_i + I - I_j^{syn} \\ \dot{u}_i &= a(bv_i - u_i) \\ v_i &\geq 30mV \begin{cases} v_i \leftarrow c \\ u_i \leftarrow u_i + d \end{cases} \\ I_j^{syn} &= - \sum_{1(i \neq j)} g_{ji} s_j (v_i - v_{syn}) \\ \dot{v}_j &= \partial(v_j)(1 - s_j) - \frac{s_j}{p} \\ \partial(v_j) &= \frac{\partial_0}{1 + e^{-\frac{v_j}{v_{shp}}}} \end{aligned} \quad (6)$$

Denklemden sinaptik ağırlıklı kupağı 'g_{ji}' parametresiyle tanımlanmaktadır. Denklem 6'da kullanılan parametrelere ait değerler $\partial_0 = 3$, $\rho = 2$, $v_{shp} = 5$ olarak alınmıştır. Modelde sinaptik bağlantı $v_{syn} = 0$ değerinde uyarıcı (ekshibitör) olurken $v_{syn} < 0$ değerinde ise engelleyici (inhibitör) olmaktadır. Standart sapma sonuçları Şekil 5'te verilen kimyasal kupağılı Izhikevich nöron modelinin grafiğine bakıldığında, standart sapma sonuçları, kupağılama ağırlığının $g < -1.1$ değerlerinde sıfır değerine yakınsamaktadır.



Şekil 4. Elektriksel kupağılı nöronların faz düzlemi, zaman alanı ve zar potansiyellerine ait fark sinyali 'ev' grafikleri a) $g = -0.4$ ve b) $g = 0.4$



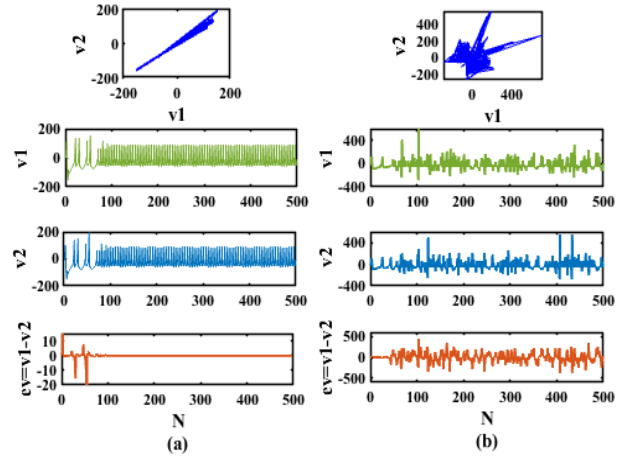
Şekil 5. Kimyasal kupağılı iki Izhikevich nöronunu ait standart sapma sonucu

Kimyasal olarak kupağılanan iki Izhikevich nöronunun kimyasal olarak kupağılandığı modele ait simülasyon sonuçları kupağılama parametresi 'g'nin sırasıyla -2 ve 2 değerleri için Şekil 6a ve 6b'de verilmektedir.

3 Elektriksel ve kimyasal olarak kupağılanan Izhikevich nöron modelinin geri adımlama kontrol yöntemi ile senkronizasyonu

Bu kısımda, mevcut olan sistemi bir kontrolörle birleştirerek yinelemeli hesaplamalar yapan ve sistemin kararlılığını garanti etmek için Lyapunov fonksiyonu kullanan geri adımlama kontrol yöntemi uygulanmıştır. Sonrasında

GAKY'nin uygulandığı elektriksel ve kimyasal kupağılı Izhikevich nöron modelinin dinamik davranışlarını gösteren simülasyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 6. Kimyasal kupağılı nöronların faz düzlemi, zaman alanı ve zar potansiyellerine ait fark sinyali 'ev' grafikleri a) $g = -2$ ve b) $g = 2$

Kontrolör 'K' hem elektriksel hem de kimyasal kupağılı Izhikevich nöron modelinde, ikinci nörona ait membran potansiyelini ifade eden denkleme eklenmiştir. İlk defa bu çalışma ile geri adımlama kontrol yöntemi, Izhikevich nöron modeline uyarlanmıştır. Ele alınan model Denklem (7)'de verilmektedir. Denklemden yer alan $x \in R^n$ 'ni ifade ederken, $n \geq 1$, 'z_i' ifadesi skaler bir değer ve 'u' ise sabit bir değerdir. 'f' fonksiyonu orjinde sıfır değerini alırken, 'g' fonksiyonunun değeri sıfırdan farklı olmaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f_x + g_x(x)z_1 \\ \dot{z}_1 &= f_1(x, z_1) + g_1(x, z_1)z_2 \\ \dot{z}_2 &= f_2(x, z_1, z_2) + g_2(x, z_1, z_2)z_3 \\ &\vdots \\ \dot{z}_i &= f_i(x, z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, z_i) + \\ &g_i(x, z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, z_i)z_{i+1} \quad \text{for } 1 \leq i \leq k-1 \\ &\vdots \\ \dot{z}_{k-1} &= f_{k-1}(x, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}) \\ &\quad + g_{k-1}(x, z_1, z_2, \dots, z_{k-1})z_k \\ \dot{z}_k &= f_k(x, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}) + g_k(x, z_1, z_2, \dots, z_{k-1})u \end{aligned} \quad (7)$$

Yukarıda tanımlanan denklem sistemine ait alt sistem denklemleri, Denklem (8)'de verilmektedir ve bu denklem orjinde kararlıdır.

$$\dot{x} = f_x(x) + g_x(x)u_x(x) \quad (8)$$

GAKY literatürde birçok doğrusal olmayan sisteme uyarlanmıştır [24, 25]. GAKY ile son kontrolör 'K' türetilinceye kadar 'z_i' denklemlerini kullanarak oluşturulan yeni sistemleri kararlı hale getirebilmektedir. Elektriksel ve kimyasal kupağılı iki Izhikevich nöronuna GAKY'nin uygulanması durumunda, nöron modellerine ait hata tanımları kullanılarak genel bir denklem elde edilebilir.

İlk olarak elektriksel kupağılı Izhikevich nöron modeli ele alınarak sisteme GAKY adapte edilmiştir. Sonrasında

kontrol yöntemi, kimyasal kuplajlı Izhikevich nöron modeline adapte edilmiştir.

Geri adımlamalı kontrolörün ikinci nörona adapte edildiği, elektriksel kuplajlı iki Izhikevich nöronuna ait denklemler aşağıda verilmektedir. Benzer şekilde kontrolör kimyasal olarak kuplajlanan Izhikevich nöron modeline de adapte edilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= 0.04v_1^2 + 5v_1 + 140 - u_1 + I - g(v_1 - v_2) \\ \dot{u}_1 &= a(bv_1 - u_1) \\ v_1 &\geq 30 \text{ mV} \Rightarrow \begin{matrix} v_1 \leftarrow c \\ u_1 \leftarrow u_1 + d \end{matrix} \\ \dot{v}_2 &= 0.04v_2^2 + 5v_2 + 140 - u_2 + I - g(v_2 - v_1) \\ &\quad + K_e \\ \dot{u}_2 &= a(bv_2 - u_2) \\ v_2 &\geq 30 \text{ mV} \Rightarrow \begin{matrix} v_2 \leftarrow c \\ u_2 \leftarrow u_2 + d \end{matrix} \end{aligned} \quad (9)$$

Elektriksel ve kimyasal kuplajlı iki Izhikevich nöronuna geri adımlamalı kontrol yöntemiyle senkronize edilmesi durumunda, Denklem (5)'te verilen hata tanımlamaları kullanılarak, aşağıda verilen genel bir denklem elde edilmektedir:

$$z_1 = e_u \Rightarrow \dot{z}_1 = \dot{e}_u = abe_v - ae_u \quad (10)$$

Burada $e_v = \zeta_1(z_1)$ 'dir ve sanal bir kontrol girişi kabul edilmiştir. Burada z_1 alt sistemi kararlı hale getirilmek istenmektedir ve bunun için Denklem (11)'de verilen pozitif Lyapunov fonksiyonu seçilmiştir. Bu fonksiyonun türevine ait ifade Denklem (12)'de verilmektedir.

$$V_1 = \frac{z_1^2}{2} \quad (11)$$

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = ab\zeta_1 z_1 - az_1^2 \quad (12)$$

Eğer $\zeta_1 = 0$ seçilirse, $\dot{V}_1 = -az_1^2 < 0$ olur ve Denklem (12)'deki alt sistem z_1 asimptotik kararlı olmaktadır. Denklem (11) ve (12), elektriksel ve kimyasal olarak kuplajlı Izhikevich nöronlarına ait ortak denklilerdir. Yönteme devam edilirken, tanımlanan alt sistem z_1 'den sonra başka bir alt sistem olan z_2 tanımlanır. Tanımlanan z_2 alt sistemi e_v hata denkliği ile $\zeta_1(z_1)$ fonksiyonu arasındaki hata tanımı olarak ifade edilmektedir. z_2 alt sistemleri, elektriksel ve kimyasal kuplajlı Izhikevich nöronları için sırasıyla Denklem (13) ve (14)'te ayrı ayrı verilmektedir. Denklemlerde ' K_e ' elektriksel kuplajlı Izhikevich nöron modeline ait geri adımlamalı kontrolörü ifade ederken, ' K_k ' kimyasal kuplajlı Izhikevich nöron modeline ait geri adımlamalı kontrolörü ifade etmektedir. ' A ' ise $A = I_1^{syn} - I_2^{syn}$ şeklindedir.

$$\begin{aligned} z_{2e} = e_v - \zeta_1(z_1) &\Rightarrow \dot{z}_2 = \dot{e}_v - \dot{\zeta}_1(z_1) \\ &= ab\zeta_1 z_1 - az_1^2 \\ &\quad + 0.04z_2^2(v_1 + v_2) + 5z_2^2 - z_1 z_2 \\ &\quad - K_e z_2 - 2gz_2^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} z_{2k} = e_v - \zeta_1(z_1) &\Rightarrow \dot{z}_2 = \dot{e}_v - \dot{\zeta}_1(z_1) \\ &= ab\zeta_1 z_1 - az_1^2 \\ &\quad + 0.04z_2^2(v_1 + v_2) + 5z_2^2 - z_1 z_2 \\ &\quad - K_k z_2 - 2A \end{aligned} \quad (14)$$

z_2 alt sistemleri kararlı hale getirmek için aşağıdaki gibi ikinci bir pozitif tanımlı Lyapunov fonksiyonu tanımlanmaktadır.

$$V_2 = V_1 + \frac{z_2^2}{2} \quad (15)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \quad (16)$$

Denklem (12) ve (13)'te verilen değişkenler, Denklem (16)'da yerlerine yazılmıştır. Böylece pozitif tanımlı Lyapunov fonksiyonuna ait türev ifadesi elektriksel kuplajlı Izhikevich nöronları için Denklem (17)'de elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2e} &= abz_1 z_2 - az_1^2 + 0.04 z_2^2(v_1 + v_2) + 5z_2^2 \\ &\quad - z_1 z_2 - K_e z_2 - 2gz_2^2 \end{aligned} \quad (17)$$

Benzer şekilde, Denklem (16)'ya Denklem (12) ve (14)'te yer alan ilgili değişkenlerin yerlerine yazılması ile elde edilen pozitif tanımlı Lyapunov fonksiyonunun türevi, kimyasal kuplajlı Izhikevich nöronları içinde Denklem (18)'de elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2k} &= abz_1 z_2 - az_1^2 + 0.04 z_2^2(v_1 + v_2) + 5z_2^2 \\ &\quad - z_1 z_2 - K_k z_2 - Az_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Kesin negatif değerler, Denklem (17) ve (18)'de göz ardı edildiğinde, kuplajlı iki Izhikevich nöronu için elde edilen geri adımlamalı metoda ait kontrolörün matematiksel ifadesi elektriksel ve kimyasal kuplajlama durumları için sırasıyla Denklem (19) ve (20)'de verilmektedir.

$$K_e(u, v) = abe_u + 0.04e_v(v_1 + v_2) + 5e_v - e_u - 2ge_v \quad (19)$$

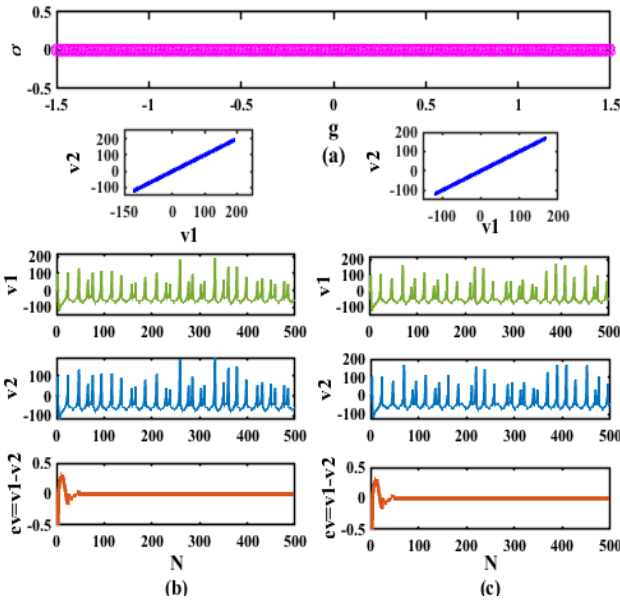
$$K_k(u, v) = abe_u + 0.04e_v(v_1 + v_2) + 5e_v - e_u - (I_1^{syn} - I_2^{syn}) \quad (20)$$

Elde edilen kontrol parametreleri daha önce Izhikevich nöron modelini kullandığımız çalışmalarımızdakilerle benzer çıkmaktadır. ' K_e ' Lyapunov kontrol yöntemi ile senkronizasyon sağladığımız çalışmamızdaki [26] kontrol parametresi ile, ' K_k ' parametresi ise yine Lyapunov kontrol metodu kullandığımız çalışmamızdaki [20] kontrol parametresi ile benzer çıkmaktadır. Bunun nedeni GAKY'nin tekrarlamalı bir yöntem olması ve Lyapunov fonksiyonun kullanılarak, nihai kontrolöre ulaşıncaya alt sistemler oluşturulup, kademeli olarak kontrol edilmesidir. Izhikevich nöron modeli 2 adet diferansiyel sistemden oluştuğu için sistemin kontrol parametresi, Lyapunov kontrol yöntemi ile bulunan sonuçlarla benzer çıkmaktadır. Bu çalışma ile Izhikevich nöron modelinin senkronizasyonu

için GAKY'nin de kullanılarak, sistem senkronizasyonun sağlanabileceği gösterilmek istenmiştir.

GAKY ile elde edilen kontrolörlerin modele entegre edildiği simülasyon sonuçlarına ait grafikler; elektriksel ve kimyasal kuplajlı nöronlar için sırasıyla Şekil 7 ve 8'de verilmektedir.

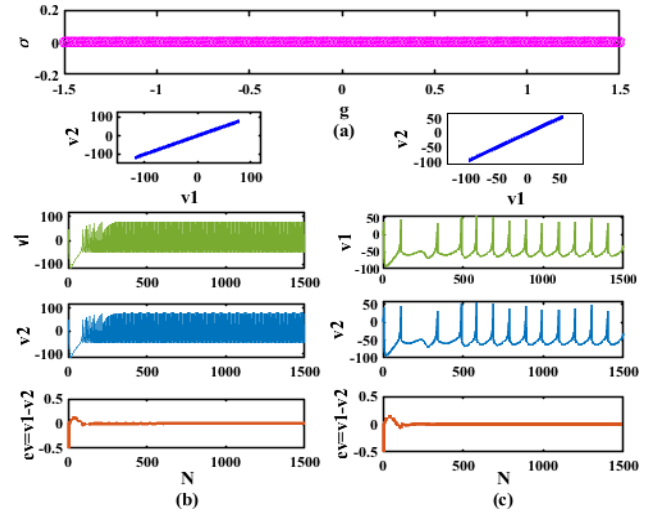
Şekil 7'de elektriksel kuplajlı yapıda kuplajlama ağırlığı 'g' değerleri sırasıyla -0.4 ve 0.4 iken Şekil 8'de verilen kimyasal olarak kuplajlanan yapıda kuplajlama ağırlıkları 'g' değerleri sırasıyla -2 ve 2 olarak alınmıştır. Bu simülasyon sonuçlarına göre, kuplajlı Izhikevich nöronlarına GAKY uygulanmasıyla, iki nöronun, kuplajlama ağırlıklarından bağımsız olarak eş zamanlı olarak ateşlendiği gösterilmektedir.



Şekil 7. GAKY ile senkron hale getirilen elektriksel kuplajlı iki Izhikevich nöronunun simülasyon sonuçları: a) Standart sapma analizi sonuçları. Elektriksel kuplajlı nöronların faz düzlemi, zaman alanı ve zar potansiyellerine ait fark sinyali 'ev' grafikleri b) $g=-0.4$ ve c) $g=0.4$ için.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada elektriksel ve kimyasal olarak kuplajlanan Izhikevich nöron modeline Lyapunov kontrol metoduna alternatif olabilecek bir metot olan geri adımlamalı kontrol metodu uygulanarak sistem eş zamanlı hale getirilmiştir. Bu amaçla, çalışmanın ilk bölümünde farklı harici akım değerleri altında Izhikevich nöron modelinin Lyapunov üstel değerleri hesaplanmıştır. Burada harici akım parametresinin $I=-99$ değerinde Izhikevich nöron modeline ait kaotik davranış sergilediğini gösteren grafikler verilmiştir. Çalışma boyunca 'I' parametresi -99 olarak alınmış ve teorik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında, elektriksel ve kimyasal kuplajlama metodu ile ayrı ayrı kuplajlanan iki Izhikevich nöron modeline ait standart sapma sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 8. GAKY ile eş zamanlı hale getirilen kimyasal kuplajlı iki Izhikevich nöronunun simülasyon sonuçları: a) Standart sapma analizi sonuçları. Kimyasal kuplajlı nöronların faz düzlemi, zaman alanı ve zar potansiyellerine ait fark sinyali 'ev' grafikleri b) $g=-2$ ve c) $g=2$ için

Sonrasında kuplajlı iki Izhikevich nöron modeline GAKY uygulanarak, hem elektriksel kuplajlı hem de kimyasal kuplajlı Izhikevich nöronları eş zamanlı hale getirilmiştir. GAKY'nin Izhikevich nöron modeline uygulanması sonucu elde edilen kontrolör, daha önceki çalışmalarımızda Lyapunov kontrol metodu uyguladığımız Izhikevich nöron modelindeki kontrolörle aynı çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni geri adımlamalı kontrol metodunun tekrarlamalı bir sistem olması ve Izhikevich nöron modelinin iki adet diferansiyel denklemden oluşmasıdır. Ayrıca kaotik sistemler parametre değerlerine aşırı bağlıdır. Bu çalışmada diğer çalışmalarımızdan farklı olarak 'c' parametresi değeri '-55' olarak alınmıştır ve bu değerde de sistemin kaotik davranış sergilediği simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir. Bu süreçlerin sonucunda, kontrolör yapısının kullanıldığı elektriksel ve kimyasal olarak ayrı ayrı kuplajlanan sistemde, nöron dinamiklerinin, kuplajlama ağırlığından bağımsız olarak eş zamanlı bir şekilde ateşlendiği gözlemlenmiştir.

Bu kapsamda, çalışmamızın yenilik getiren yönlerini şu şekilde özetleyebiliriz: I) kimyasal olarak kuplajlanan Izhikevich nöronlarının senkronizasyon kontrolüyle literatürdeki sınırlı sayıda çalışmaya dikkate değer bir katkı sağlanmıştır, II) elektriksel ve kimyasal kuplajlı Izhikevich nöronlarının senkronizasyon kontrolü ilk defa GAKY ile sağlanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] A.E. Pereda, Electrical synapses and their functional interactions with chemical synapses, Nat Rev Neurosci., 15(4), 250-263, 2014. <https://doi.org/10.1038/nrn3708>.

- [2] A. L. Hodgkin and A. Huxley, A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *The Journal of Physiology* 117 (4), 500-544, 1952. [https://doi.org/10.1016/S0092-8240\(05\)80004-7](https://doi.org/10.1016/S0092-8240(05)80004-7).
- [3] H. R. Wilson and J. D. Cowan, Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons. *Biophysical Journal* 12 (1), 1–24, 1972. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(72\)86068-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(72)86068-5).
- [4] R. FitzHugh, *Mathematical models for excitation and propagation in nerve*, Schawn,H.P., McGraw-Hill, New York, 1969.
- [5] C. Morris and H. Lecar, Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber, *Biophysical Journal* 35 (1), 193–213, 1981. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(81\)84782-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(81)84782-0).
- [6] J. Hindmarsh and R. M. Rose, A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* 221 (1222), 87-102,1984. <https://doi.org/10.1098/rspb.1984.0024>.
- [7] E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, *IEEE Trans. Neural Networks* 14(6), 1569–1572, Nov. 2003. <https://doi.org/10.1109/TNN.2003.820440>.
- [8] S. A. Malik, A. H. Mir, Synchronization of Hindmarsh Rose Neurons, *Neural Networks*, 123, 372-380, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.11.024>.
- [9] H. Yu, J. Peng, Chaotic synchronization and control in nonlinear-coupled Hindmarsh–Rose neural systems. *Chaos, Solit. Fractals* 29 (2), 342–348 2006. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.08.075>.
- [10] Z. Çimen, N. Korkmaz, Y. Altuncu, R. Kılıç, Evaluating the effectiveness of several synchronization control methods applying to the electrically and the chemically coupled hindmarsh-rose neurons, *Biosystems*, 198, 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2020.104284>.
- [11] Z.Karaca, N. Korkmaz, Y. Altuncu, R.Kılıç, An extensive FPGA-based realization study about the Izhikevich neurons and their bio-inspired applications. *Nonlinear Dyn* 105, 3529–3549, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06647-1>.
- [12] C.-H. Li, S.-Y. Yang, Eventual dissipativeness and synchronization of nonlinearly coupled dynamical network of Hindmarsh–Rose neurons, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39(21), 6631-6644, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.02.017>.
- [13] Y. Che, J. Wang, K. M. Tsang, W. L. Chan, Unidirectional synchronization for Hindmarsh-Rose neurons via robust adaptive sliding mode control. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 11(2), 1096-1104, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2009.02.004>.
- [14] X. Liu, & C. Tianping, Synchronization analysis for nonlinearly-coupled complex networks with an asymmetrical coupling matrix, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, vol. 387 (16), 4429-4439, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.03.005>.
- [15] D. Bin, W. Jiang and F. Xiangyang, Synchronizing two coupled chaotic neurons in external electrical stimulation using backstepping control, *Chaos, Solitons & Fractals*, 29 (1), 182–89, 2006. <http://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.08.027>.
- [16] S. Zhang, E. -M. Yong, Y. Zhou and W. -Q. Qian, Dynamic backstepping control for pure-feedback nonlinear systems, in *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 37 (1), 670-693, 2020, <http://doi.org/10.1093/imamci/dnz019>.
- [17] H. K. Khalil, and J. W. Grizzle, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [18] S. H. Yu, , C. H. Hyunand and M. N. Park, Backstepping control and synchronization for 4-D Lorenz-Stenflo chaotic system with single input, *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems* 11(3), 143-148, 2011. <https://doi.org/10.5391/ijfis.2011.11.3.143>.
- [19] S. Vaidyanathan, A. T. Azar, *Backstepping Control of Nonlinear Dynamical Systems 1st*, Academic Press, Elsevier, 2020
- [20] Z. Karaca, N. Korkmaz, Y. Altuncu &R. Kılıç, Kimyasal Kuplajlı Izhikevich Nöron Modelinin Lyapunov Kontrol Metodu ile Senkronizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Özel Sayı (RDCONF)*, 736-740, 2021. <http://doi.org/10.31590/ejosat.1042337>
- [21] N. Korkmaz, İ. Öztürk, A. Kalımlı, and R. Kılıç, Hardware verification: Determining the parameters of the modified Izhikevich neuron model with genetic algorithm, *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pp. 588-592, Bursa, 30, 2017.
- [22] E. M. Izhikevich, Which model to use for cortical spiking neurons?, *IEEE Transactions on Neural Networks* 15(5), 1063-1070, 2004. <https://doi.org/10.1109/TNN.2004.832719>.
- [23] S. Lynch, *Dynamical systems with applications using MATLAB*. Boston: Birkhäuser. 2004.
- [24] B. Deng, J. Wang, X. Fei, Synchronizing two coupled chaotic neurons in external electrical stimulation using backstepping control. *Chaos, Solit. Fractals* 29, 182–189. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.08.027>
- [25] C. C. Peng, & C. L. Chen, Robust chaotic control of Lorenz system by backstepping design. *Chaos, Solitons Fractals*, 37(2), 598–608, 2008 <https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2006.09.057>.
- [26] Z. Karaca, N. Korkmaz, Y. Altuncu and R. Kılıç, An extensive FPGA-based realization study about the Izhikevich neurons and their bio-inspired applications. *Nonlinear Dyn* 105, 3529–3549, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06647-1>.





Türkiye’de satışı sunulan çaylarda ve bitki çaylarında fitalat ester düzeylerinin belirlenmesi

Determination of phthalate ester levels in teas and herbal teas available in Türkiye

İsra Toptancı^{1,*} 

¹Istanbul Gıda Kontrol Laboratuvar Müdürlüğü Florya Cad. No:78 Bakırköy, İstanbul, Türkiye

Öz

Fitalatlar, gıda ürünlerinde ve kişisel bakım ürünlerinde plastikleştiriciler ve katkı maddeleri olarak kullanılır. Yapılan araştırmalar, fitalatların insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Beş fitalat esteri (dibütil fitalat (DBP), benzil bütil fitalat (BBP), di(2-etilheksil) fitalat (DEHP), diisononil fitalat (DINP) ve diizodesil fitalat (DIDP)) 30 farklı çay ve bitkisel çaylarda likit kromatografi kütle spektrofotometresi (LC/MS/MS) ile incelenmiştir. Bu çalışma, Türkiye’de tüketilen siyah çay, yeşil çay ve bitkisel çaylarda fitalatların varlığını göstermiştir. Analiz edilen çay örneklerinde en yaygın DBP, 30 örneğin 19’unda (5.78-44.99 µg/kg) tespit edilmiştir. DEHP ikinci en yaygın belirlenen fitalat olup 30 örneğin 14’ünde (5.65-60.83 µg/kg) tespit edilmiştir. Diğer belirlenen fitalat BBP olup, 30 örnekten 5’inde 9.35-44.95 µg/kg olarak tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Fitalat, LC/MS/MS, Çay

1 Giriş

Fitalat esterleri, geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine sahip organik ve sentetik kimyasal bileşik grubudur. Bunlar, genellikle endüstriyel, tarımsal ve evsel uygulamalarda plastikleştiriciler olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Fitalatlar temelde düşük ve yüksek moleküler ağırlıklı bileşikler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir ve migrasyon nedeniyle üretim, kullanım veya atık bertarafı sırasında birçok gıda matriksinde bulunabilirler. Fitalatların ambalaj filmlerinden çeşitli gıdalara ve gıda benzerlerine migrasyonu rapor edilmiştir. Paketlenmiş gıdaya geçen fitalat miktarı, gıdanın yağ içeriği, ambalaj malzemesindeki plastikleştirici maddenin türü, başlangıç konsantrasyonu, depolama süresi ve sıcaklığı, aynı zamanda temas alanı gibi birçok faktöre bağlıdır [1-7].

Fitalatlar, özellikle erken yaşam maruziyetleriyle ilişkilendirilen endokrin sistemi bozan maddeler olarak insan sağlığına zararlı etkiler gösterebilir. Bunun yanı sıra, fitalatların toksik etkileri daha zararlı metabolitlerle ve metabolik dönüşümlerle bağlantılıdır. Yüksek konsantrasyonlarda fitalatlara maruz kalma, insanlar ve hayvanlar üzerinde üreme ve gelişim üzerinde olumsuz

Abstract

Phthalates are used as plasticizers and additives in food products and personal care items. The conducted studies have demonstrated the negative effects of phthalates on human health. Five phthalates esters (dibutyl phthalate (DBP), benzyl butylphthalate (BBP), di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP), diisononyl phthalate (DINP), and diisodecyl phthalate (DIDP)) were investigated in 30 different types of tea and herbal infusions using liquid chromatography-mass spectrometry (LC/MS/MS). This study demonstrated the presence of phthalates in black tea, green tea, and herbal infusions consumed in Turkey. Among the analyzed tea samples, DBP was the most common, detected in 19 out of 30 samples (ranging from 5.78 to 44.99 µg/kg). DEHP was the second most frequently detected phthalate, found in 14 out of 30 samples (ranging from 5.65 to 60.83 µg/kg). The other detected phthalate was BBP, which was found in 5 out of 30 samples (ranging from 9.35 to 44.95 µg/kg).

Keywords: Phthalate, LC/MS/MS, Tea

etkiler gösterebilir. Dünya genelinde yılda bir milyondan tondan fazla fitalat üretilmektedir. Di(2-etilheksil) fitalat (DEHP), yılda 2 milyon ton üretimle en yaygın fitalatlardan biridir, inşaat malzemelerinde, gıda ambalajında ve tıbbi ürünlerde kullanılmaktadır. Sağlık üzerindeki olumsuz etkiler açısından en çok araştırılan fitalatlardan biri DEHP’tir. DEHP, hayvan deneylerinde üreme toksisitesine neden olabilir. Diğer yaygın olarak kullanılan fitalatlar arasında dibütil fitalat (DBP), benzil bütil fitalat (BBP), diisononil fitalat (DINP) ve diizodesil fitalat (DIDP) bulunmaktadır [2].

Çay, suyun hemen ardından en sık tüketilen içecektir ve dünya genelinde günde yaklaşık 20 milyar fincan tüketilmektedir. Çay, çay bitkisinin (*Camellia sinensis* ve *Camellia assamica*) işlenmiş yapraklarından yapılır. Çay, antioksidan, antimikrobiyal, antiobezite ve antikanserijen özellikleri nedeniyle giderek artan bir ilgi görmüştür. Ancak, çayda organik kirleticiler, ağır metaller ve pestisitler gibi zehirli maddelerin bulunması da endişe kaynağı olarak ortaya çıkmıştır. Toprak, su ve atmosferden gelen organik kirleticiler, birikmesi öncesinde uzun mesafeler boyunca taşınabilir ve bitkilerde birikebilir. Örneğin, farklı türdeki bitkiler plastik örtü filmi ve topraktan DEHP’yi absorbe edebilir. Çayda biriken organik kirleticiler, üretim sırasında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: isratoptanci06@gmail.com (İ. Toptancı)

Geliş / Received: 13.08.2023 Kabul / Accepted: 29.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1342380

makinelere tarafından yayılan veya havada bulunan kirleticilerden kaynaklanır [3].

Bitki çayı, çaya benzese de ve aynı şekilde demlense de aslında çay olarak kabul edilmez. Bunun nedeni, tüm çayların yapıldığı bitki olan *Camellia sinensis* familyasından gelmemeleridir. Bitki çayları aslında çeşitli bileşenlerin karışımıdır ve 'bitki çayı karışımları' olarak bilinir. Bitki çayları, kurutulmuş yapraklar, tohumlar, otlar, fındıklar, kabuklar, meyveler, çiçekler veya diğer bitkisel elementlerin kombinasyonlarından yapılır, bunlar onlara lezzetlerini verir ve bitki çaylarının faydalarını sağlar [8].

Çay yaprakları, havadan, sudan, topraktan ve üretim hatlarında biriken fitalatlarla kontamine olabilir. Ayrıca, çay demlemelerindeki fitalatların varlığı, üretim hatlarına eklenen esansiyel yağlar, sentetik esanslar ve renklendiriciler nedeniyle olabilir [9].

Avrupa Birliği (AB), DBP, BBP ve DEHP gibi 12 fitalatın potansiyel endokrin bozucu özelliklere sahip olabileceğini belirtmiştir [2,4]. Gıda ürünleriyle temas etmesi amaçlanan plastik malzemelerde bulunan fitalat esterleri nedeniyle Avrupa Birliği tarafından belirlenen spesifik migrasyon limitleri (SML) 0.12 mg kg⁻¹ DBP, 6 mg kg⁻¹ BBP, 0.6 mg kg⁻¹ DEHP ve 1.8 mg kg⁻¹ DINP ve DIDP olarak belirlenmiştir [10].

Çalışmanın amacı, Türkiye'de satışı sunulan siyah çay, yeşil çay ve bitki çaylarında (adaçayı, nane limon çayı, papatya ve ihlamur) insan sağlığı açısından risk oluşturabilecek 5 adet fitalat esterinin (BBP, DEHP, DBP, DIDP, DINP) varlığını LC/MS/MS sistemi ile araştırmaktır.

2 Materyal ve metot

Fitalat esterleri (BBP, DEHP, DBP, DIDP, DINP) olmak üzere beş farklı standart, Dr. Ehrenstorfer'den temin edilmiştir. Ekstraksiyon işlemi için gereken asetonitril ve metanol gibi solventler, Merck (Darmstadt, Almanya) tarafından sağlanmıştır. Deneyde yüksek saflıkta su elde etmek amacıyla Millipore Milli-Q sistemi (Milford, MA, ABD) kullanılmıştır. Piyasadan 2023 yılında 5 markaya (A, B, C, D, E) ait 6 farklı siyah çay, yeşil çay ve bitki çayları satın alınmıştır. Bu örneklerle ait kodlar Tablo 1' de verilmiştir.

2.1 Metot

2.1.1 Fitalat esteri standartlarının ve kalibrasyon noktalarının hazırlanması

Her bir fitalat esteri standardından (BBP, DEHP, DBP, DIDP, DINP), 10 mg alınarak 20 mL metanol içinde çözülmüştür. Her bileşeni içeren ara stok çözeltisi (5 mg/kg) hazırlamak için, 500 mg/kg ana stok çözeltisinin 1 mL alınarak 100 mL ölçüm balonuna aktarılıp her bir fitalat esteri bileşenini içeren 5 mg/kg'lık mix ara stok çözeltisi hazırlanmıştır. Kalibrasyon noktaları 5 mg/kg'ın ara stok çözeltisinin uygun seyreltilmesi ile 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.75 ve 0,1 mg/kg olarak hazırlanmıştır.

2.1.2 Fitalat esteri analizi için numune hazırlama

Fitalat esteri analizi, modifiye Quechers yöntemine göre yapılmıştır [5]. Bunun için 2 g çay 50 mL'lik santrifüj tüpüne tartılmış ve üzerine 5 mL deiyonize su eklenmiştir. Santrifüj

tüpüne 5 g MgSO₄, 5 g NaCl ve bunların üzerine 10 mL asetonitril ilave edilmiştir. 1 dakika süre ile karıştırılmış ve 5000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilmiştir. Oluşan fazın üst kısmından 2 mL alınıp 15 mL'lik santrifüj tüpüne 100 mg MgSO₄, 200 mg primer sekonder amin (PSA) ve 100 mg C18 katılmıştır. 5000 rpm'de 1 dakika santrifüj edildikten sonra üst fazdan küçük bir şişeye (viale) 1'er mL alınarak LC-MS/MS, enjekte edilmiştir.

Tablo 1. Örnek kodları ve çay çeşitleri

Örnek kodu	Çay
A1	Yeşil Çay
A2	Ihlamur
A3	Ada Çayı
A4	Nane Limon Çayı
A5	Papatya
A6	Siyah Çay
B1	Yeşil Çay
B2	Ihlamur
B3	Ada Çayı
B4	Nane Limon Çayı
B5	Papatya
B6	Siyah Çay
C1	Yeşil Çay
C2	Ihlamur
C3	Ada Çayı
C4	Nane Limon Çayı
C5	Papatya
C6	Siyah Çay
D1	Yeşil Çay
D2	Ihlamur
D3	Ada Çayı
D4	Nane Limon Çayı
D5	Papatya
D6	Siyah Çay
E1	Yeşil Çay
E2	Ihlamur
E3	Ada Çayı
E4	Nane Limon Çayı
E5	Papatya
E6	Siyah Çay

2.1.3 LC/MS/MS ile Fitalat esterlerinin belirlenmesi

Fitalat esteri analizi tanımlanması ve belirlenmesinde, Agilent 6460 model sıvı kromatografisi (LC) sistemine bağlanmış olan tandem kütle spektrometresi (MS/MS) sistemi ve JetStream elektrosprey kaynağı ile aşağıda belirtilen cihaz şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Fitalat esteri analizi için mobil faz A çözeltisi (su içinde 10 mmol/L amonyum asetat) ve B çözeltisi (asetonitril)

hazırlanmış ve gradient programı: 0–1 dk arası, 0,2 mL/dk akışta %60 B; 1–10 dk arası, % 85 B, 10-12 dakika arası % 100 B ve 20 dakika boyunca % 100 mobil faz B'den oluşturulmuştur. Kolon, 40°C'de çalıştırılan bir Poroshell 120 EC-C18 (2.7 µm, 2.1×150 mm) (Agilent Technologies, ABD) dir. Dedektör (MS) koşulları: pozitif mod da çalışan elektrosprey iyonizasyon kaynağı; source sıcaklığı: 130°C, capillary: 4000 V, nebulizer basıncı: 45 psi, kuru gaz akış hızı: 11 L/dak'dır. Bunun yanı sıra her bileşene ait LC/MS/MS parametreleri **Tablo 2**'de verilmiştir.

Tablo 2. Fitalat esterleri LC/MS/MS parametreleri

Fitalat esterleri	Precursor Ion	Product Ion	Collision Energy	Polarite
BBP	313.1	205	2	Positive
	313.1	91	22	Positive
DBP	279.1	205.1	2	Positive
	279.1	120.9	35	Positive
DEHP	391	279	5	Positive
	391	167	15	Positive
DINP	419.3	149	12	Positive
	419.3	71	20	Positive
DIDP	447.3	149	22	Positive
	447.3	85	23	Positive

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmada, fitalat esterlerinin (BBP, DEHP, DBP, DIDP, DINP) varlığı araştırılmıştır. Fitalat esterlerinden BBP, DEHP, DBP tespit edilirken diğer bileşenler belirlenmemiştir.

Fitalat esterleri metot validasyonu için tespit limiti (LOD), tayin limiti (LOQ), geri kazanım kesinlik (tekrarlanabilirlik ve tekrarüretilebilirlik) parametreleri çalışılmıştır. LOD ve LOQ değerleri sırasıyla 1.4-2 ile 3.2-4.5 µg/kg aralığındadır. Ortalama geri kazanımlarının % 85.6-93 olduğu ve tüm konsantrasyon seviyeleri için RSD değerlerinin %15'in altında olduğu tespit edilmiştir (**Tablo 3**). Farklı markalara ait çay ve bitkisel çaylara ait fitalat esterlerinin miktarları (µg/kg) **Tablo 4**'de verilmiştir.

Tablo 3. Fitalat esterleri metot validasyon parametreleri

Fitalat esterleri	r ²	LOD (µg/kg)	LOQ (µg/kg)	Geri Kazanım %, (RSD %)		
				5 µg/kg	50 µg/kg	100 µg/kg
BBP	0.999	1.4	3.2	85.6 (8)	88.9 (7)	92 (5)
DBP	0.999	1.4	3.2	89 (9)	91.3 (6)	93 (4)
DEHP	0.999	1.5	3.6	85.7 (9)	87.8 (6)	93 (5)
DINP	0.999	2	4.5	86.4 (9)	87.7 (8)	90.2 (6)
DIDP	0.999	2	4.5	87.1 (8)	88.5 (7)	92.3 (5)

Yin vd. [5] toplam 105 yeşil ve siyah çay örneklerinde yaptıkları çalışmada DEP, DEHP ve DBP fitalat esterlerini tespit etmişlerdir. Tang vd. [11] tarafından yapılan çalışmada siyah çayda DEP, DBP ve DEHP başlıca belirlenen fitalat esterleridir.

Fitalat esterleri arasında en yaygın tespit edilen DBP'dir. Araştırmada kullanılan 30 örneğin 10'unda DBP tespit edilememiştir. DBP en fazla sırasıyla E marka ve A marka yeşil çayda belirlenmiştir (44.99 µg/kg-30.82 µg/kg). Bunun yanında E marka siyah çay örneğin de DBP miktarı 23.95 µg/kg tespit edilmiştir. DBP, tüm markaların nane limon bitki çaylarında tespit edilememiştir.

BBP fitalat esterleri A, B, D ve E marka siyah çayların tümünde sırasıyla 9.35 µg/kg, 9.64 µg/kg, 10,90 µg/kg ve 44.95 µg/kg olarak tespit edilmiştir. BBP diğer bitki çaylarında ve yeşil çayda tespit edilememiştir. Sadece E marka yeşil çayda 21.86 µg/kg olarak belirlenmiştir

Her markanın yeşil ve siyah çaylarında DBP ve DEHP fitalat esterleri belirlenmiştir. DINP ve DIDP fitalat esterleri siyah çay, yeşil çay ve bitki çaylarında tespit edilememiştir (**Şekil 1**).

Liu vd. [12], Çin de otoyol ve dağlık bölgelerden toplanan tüm taze çay yapraklarında beş fitalat esterini (DEP, DBP, DMP, DIBP ve DEHP) tespit ettiklerini ve daha yüksek konsantrasyonların olgun yapraklarda belirlendiğini bildirmişlerdir. Çalışmada, DBP miktarı 22.2-22.7 µg/kg ve DEHP miktarı 76.7-108 µg/kg aralığında değişim göstermiştir. İşleme ekipmanlarının yüzeyinden kaynaklanan veya uzun süreli yayılma sırasında atmosferik birikimden kaynaklanan DEHP'de olası bir artış, DEHP birikimine neden olabileceği bildirilmiştir.

İran da 10 çay markasında yapılan çalışmada siyah çayda DEP (55-230.5 µg/kg), DEHP (40.7-187.5 µg/kg), DBP (13.7-143.2 µg/kg), BBP (17.2-175 µg/kg) iken yeşil çayda DEP (TE), DEHP (98.5-397.7 µg/kg), DBP (25.5-289.2 µg/kg), BBP (3.7-14.7 µg/kg) aralığında belirlenmiştir [3]. Du vd. [13] yaptıkları çalışmada 20 çay örneğinde DEP'in, 3 siyah çay örneğinde tespit edilmediğini, çay örneklerinde DIBP, DBP ve DEP'in ana bileşenler olarak gözlendiğini bildirmişlerdir. İspanya'daki yerel pazardan temin edilen farklı markaların örneklerinde (3 adet siyah çay, 3 adet yeşil çay, 2 adet kırmızı çay ve bir adaçayı), incelenen bileşikler arasında, DBP en yüksek fitalat esterleri (32.7- 562.2 µg/kg) olarak belirlenmiştir [9].

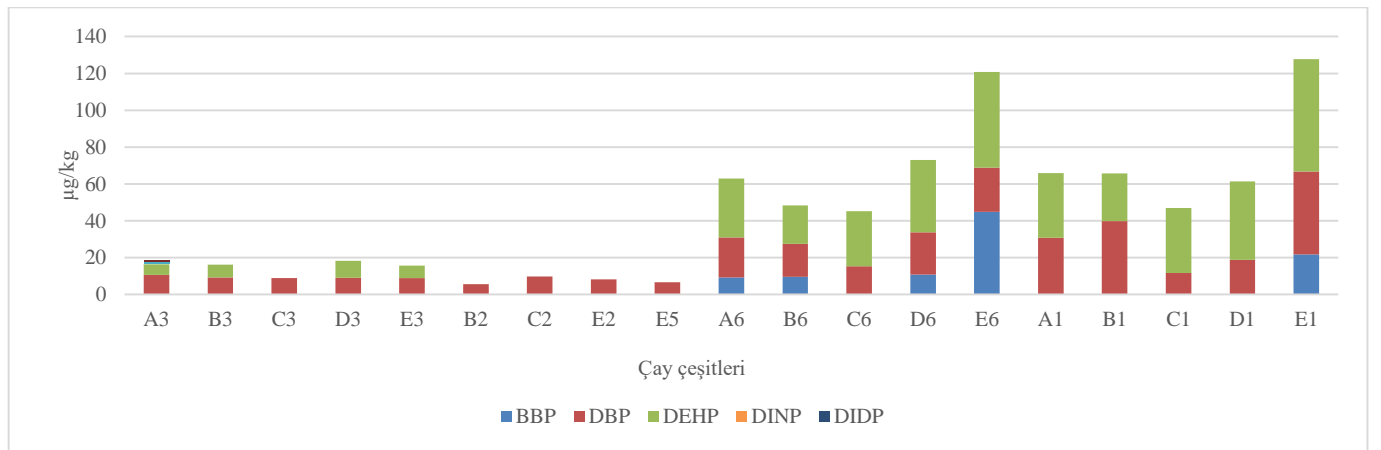
Tablo 4. Çay çeşitlerinde fitalat esterleri miktarı (µg/kg)

Örnek kodu	Çay çeşitleri	BBP	DBP	DEHP	DIBP	DIDP
A1	Yeşil Çay	TE	30.82±0.83	35.01±0.63	TE	TE
A2	Ihlamur	TE	<0.005	TE	TE	TE
A3	Ada Çayı	TE	10.75±0.78	5.65±0.21	TE	TE
A4	Nane Limon Çayı	TE	TE	TE	TE	TE
A5	Papatya	TE	TE	TE	TE	TE
A6	Siyah Çay	9.35±0.83	21.70±0.71	31.92±0.26	TE	TE
B1	Yeşil Çay	TE	39.84±0.40	25.82±0.40	TE	TE
B2	Ihlamur	TE	5.78±0.16	TE	TE	TE
B3	Ada Çayı	TE	9.34±0.16	6.81±0.15	TE	TE
B4	Nane Limon Çayı	TE	TE	TE	TE	TE
B5	Papatya	TE	TE	TE	TE	TE
B6	Siyah Çay	9.64±0.11	17.93±0.66	20.78±0.31	TE	TE
C1	Yeşil Çay	TE	11.77±0.33	35.24±0.52	TE	TE
C2	Ihlamur	TE	9.87±0.33	TE	TE	TE
C3	Ada Çayı	TE	8.97±0.18	TE	TE	TE
C4	Nane Limon Çayı	TE	TE	TE	TE	TE
C5	Papatya	TE	TE	TE	TE	TE
C6	Siyah Çay	TE	15.31±0.66	29.88±0.60	TE	TE
D1	Yeşil Çay	TE	18.85±0.35	42.46±0.22	TE	TE
D2	Ihlamur	TE	TE	TE	TE	TE
D3	Ada Çayı	TE	9.09±0.45	9.29±0.54	TE	TE
D4	Nane Limon Çayı	TE	TE	<0.005	TE	TE
D5	Papatya	TE	TE	<0.005	TE	TE
D6	Siyah Çay	10.90±0.42	22.82±0.40	39.33±0.33	TE	TE
E1	Yeşil Çay	21.86±0.65	44.99±0.45	60.83±0.53	TE	TE
E2	Ihlamur	TE	8.28±0.70	<0.005	TE	TE
E3	Ada Çayı	TE	8.88±0.32	6.79±0.13	TE	TE
E4	Nane Limon Çayı	TE	TE	TE	TE	TE
E5	Papatya	TE	6.67±0.16	<0.005	TE	TE
E6	Siyah Çay	44.95±0.92	23.95±0.78	51.97±0.52	TE	TE

TE: Tespit edilemedi

Bu çalışmanın sonuçları, tespit edilen fitalat esterlerinin önceden yapılmış olan araştırmalardaki bileşenlerle paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Çalışma ile mevcut literatür arasındaki ayrımın temel nedenleri;

örneklerin seçimindeki farklılık, uygulanan analiz yöntemlerindeki varyasyon ve kullanılan tekniklerdeki çeşitlilik olarak düşünülmektedir.



Şekil 1. Fitalat esterleri tespit edilen örneklerde miktar dağılımı

4 Sonuçlar

Fitalatlar, çevresel kirlilik kaynaklarından kaynaklanan ve insan popülasyonunun geniş ölçüde maruz kaldığı çevresel kirletici maddelerdir. Çoğu fitalatın endokrin sistem üzerinde olumsuz etkileri olduğu ve büyüme ile üreme fonksiyonlarını bozabileceği bilinmektedir. Bu çalışmada Türkiye’de satışı sunulan ve yaygın olarak tüketilen siyah çay, yeşil çay ve bitki çaylarında (adaçayı, nane limon çayı, papatya ve ihlamur) fitalat ester miktarları tespit edilmiştir. Beş farklı markanın 30 numunesinin yapılan çalışmada, sırasıyla en çok belirlenen fitalat esterleri DBP, DEHP ve BBP’dir. DINP ve DIDP analiz örneklerinde tespit edilememiştir. Bu çalışma, çay üretiminde kullanılan malzemelerin ve çay paketlerinin denetiminin, toksik bileşiklere maruziyeti engellemek ve insan sağlığı riskini azaltmak için önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] E. Tsochatzis, O. Begou, S. Kalogiannis, H. Gika, E. Oz, F. Oz and G. Theodoridis, Development, Validation and Application of an Ultra-High-Performance Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry (UHPLC-MS/MS) Method after QuEChERS Cleanup for Selected Dichloroanilines and Phthalates in Rice Samples. *Foods*, 11(10), 1482, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11101482>.
- [2] M. Kiralan, İ. Toptancı, M. Yavuz and M. F. Ramadan, Phthalates levels in cold-pressed oils marketed in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 5630-5635, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07162-y>.
- [3] M. M. Amin, F. Rastegari, P. Poursafa, and K. Ebrahim. Estimating the risk of phthalates exposure via tea consumption in general population. *International Journal of Food Studies*, 7(1), 69-78, 2018. <https://doi.org/10.7455/ijfs/7.1.2018.a6>.
- [4] S.S. Kiralan, İ. Toptancı, T. Öncül Abacıgil and M. F. Ramadan, Phthalates levels in olive oils and olive pomace oils marketed in Turkey. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 37(8), 1332-1338, 2020. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1766120>
- [5] Y. Peng, X. Liu and C. Hongping, Determination of 16 phthalate esters in tea samples using a modified QuEChERS sample preparation method combined with GC-MS/MS. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 31(8), 1406-1413, 2014. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.933490>.
- [6] X. L. Cao, W. Zhao and R. Dabeka, Di-(2-ethylhexyl) adipate and 20 phthalates in composite food samples from the 2013 Canadian Total Diet Study. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 32(11), 1893-1901, 2015. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1079742>
- [7] L. Du, L. Ma, Y. Qiao, Y. Lu and D. Xiao, Determination of phthalate esters in teas and tea infusions by gas chromatography–mass spectrometry. *Food chemistry*, 197, 1200-1206, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.082>.
- [8] European Commission, Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. *Off J Eur Union*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/10/oj>, Accessed 01 August 2023.
- [9] A. S. Alnaimat, M. C. Barciela-Alonso and P. Bermejo-Barrera, Development of a sensitive method for the analysis of four phthalates in tea samples: Tea bag contribution to the total amount in tea infusion. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 37(10), 1719-1729, 2020. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1786170>
- [10] C. Ravikumar, Review on herbal teas. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 6(5), 236-238, 2014. <https://www.jpsr.pharmainfo.in/Documents/Volumes/vol6issue05/jpsr06051404.pdf>, Accessed 21 July 2023.
- [11] Y. Tang, M. Wang, C. Pan, S. Mi, and B. Han, Determination of five phthalate esters in tea and their dynamic characteristics during black tea processing. *Foods*, 11(9), 1266, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11091266>
- [12] P. Liu, H. Chen, G. Gao, Z. Hao, C. Wang, G. Ma and X. Liu, Occurrence and residue pattern of phthalate esters in fresh tea leaves and during tea manufacturing and brewing. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(46), 8909-8917, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b03864>
- [13] L. Du, L. Ma, Y. Qiao, Y. Lu, and D. Xiao, Determination of phthalate esters in teas and tea infusions by gas chromatography–mass spectrometry. *Food chemistry*, 197, 1200-1206, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.082>





Estimating cetane numbers of pure biodiesels through multiple non-linear correlations depending on some fuel properties

Bazı yakıt özelliklerine bağlı olarak çoklu non-linear korelasyonlar yoluyla saf biyodizellerin setan sayılarının tahmin edilmesi

Mert Gülüm^{1,*} 

¹ Karadeniz Technical University, Department of Mechanical Engineering, 61080, Trabzon, Türkiye

Abstract

In the literature, multiple linear regression, machine learning methods, and group contribution methods have been employed to estimate the cetane numbers of pure biodiesels based on their properties (composition of fatty acid esters, number of carbon atoms, number of double bonds, chain length, saponification number, iodine value, etc.). However, there has been relatively limited research on the relationship between cetane number and other fuel properties. Therefore, this study purposes to utilize the multiple non-linear regression method to estimate the cetane numbers of pure biodiesels as functions of the density, kinematic viscosity, flash point, and heating value. To establish correlations, experimental data on the fuel properties of 100 different biodiesels (methyl and ethyl esters) were gathered from the literature. The predictive performances of the proposed multiple non-linear correlations were compared with the commonly recommended multiple linear correlation found in the literature. According to the results, reliable non-linear correlations, having relative errors of less than 5% and high coefficient of determination values (r^2) were obtained.

Keywords: Alternative fuels, Biodiesel, Fuel properties, Cetane number, Multiple non-linear regression

1 Introduction

Diesel engines have been widely used in various sectors (transportation, agriculture, and industry) owing to their notable advantages of efficiency and durability [1]. Heavy-duty vehicles, construction machinery, agricultural equipment, marine vessels, locomotives, and power generators have been powered by diesel engines for a long time [2]. Currently, petroleum-based fuels are the primary energy source for diesel engines. However, their combustion in diesel engines leads to harmful emissions and greenhouse gases that pose significant environmental challenges [3]. Additionally, the dependence on petroleum-based fuels owing to their non-renewable nature and the gradual decline in their reserves increases concerns about the potential risk of an energy crisis in the future [1]. For these reasons, it is necessary to channel research efforts to address these issues and find renewable alternative fuels.

Öz

Literatürde saf biyodizellerin setan sayılarını özelliklerine (yağ asidi esterlerinin bileşimi, karbon atomu sayısı, çift bağ sayısı, zincir uzunluğu, sabunlaşma sayısı, iyot değeri, vb.) bağlı olarak tahmin etmek için çoklu doğrusal regresyon, makine öğrenmesi yöntemleri ve grup katkı yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat, setan sayısı ile diğer yakıt özellikleri arasındaki ilişki üzerine nispeten sınırlı araştırma bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, yoğunluk, kinematik viskozite, parlama noktası ve ısı değere bağlı olarak saf biyodizellerin setan sayılarını tahmin etmek için çoklu doğrusal olmayan regresyon yöntemini kullanmayı amaçlamaktadır. Korelasyonları oluşturmak için, 100 farklı biyodizelin (metil ve etil esterler) yakıt özelliklerine ilişkin deneysel veriler literatürden toplanmıştır. Önerilen çoklu non-linear korelasyonların tahmin performansları, literatürde bulunan ve yaygın olarak önerilen çoklu doğrusal korelasyon ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, %5'ten daha düşük bağıl hatalara ve yüksek determinasyon katsayısı (r^2) değerlerine sahip olan güvenilir non-linear korelasyonlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Alternatif yakıtlar, Biyodizel, Yakıt özellikleri, Setan sayısı, Çoklu doğrusal olmayan regresyon

Biodiesel is one of the renewable alternative fuels that has drawn lots of attention recently. As an alternative to diesel fuel, biodiesel exhibits superior properties, including lower sulfur and aromatic contents, domestic origin, higher flash point, and enhanced biodegradability [4]. The use of biodiesel generally decreases some exhaust emissions owing to the oxygen content in its molecular structure. Moreover, biodiesel can be mixed with diesel fuel at any proportion [5]. Due to these superior properties, biodiesel is used in both the developing and developed countries. However, biodiesel has also some disadvantages that limit its widespread use, including poor cold flow properties and oxidation stability, higher viscosity, and lower heating value [4, 6]. Chemically, biodiesel is a mixture of fatty acid esters. Transesterification is the predominant method used in biodiesel production, involving the transformation of edible or non-edible vegetable oils or animal fats into mono-alkyl esters. The reaction of alcohol (generally methanol or ethanol) with

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gulum@ktu.edu.tr (M. Gülüm)

Geliş / Received: 14.08.2023 Kabul / Accepted: 17.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1342996

vegetable oils or animal fats in the presence of a catalyst (alkalis, acids, or enzymes) results in the formation of esters (biodiesel) and glycerol [7-9]. International standards such as EN 14214 and ASTM D6751 regulate the quality of biodiesel.

Density, viscosity, flash point, heating value, and cetane number are among the most significant fuel properties. Density affects atomization and engine performance. Additionally, density can contribute to engine oil sludge issues [9, 10]. Viscosity influences atomization, fuel droplet size, spray penetration, mixture formation, and consequently, the combustion process. Fuel viscosity must be kept within specified upper and lower limits [11]. Flash point serves as a safety indicator for fuel storage [9]. The heating value (heat of combustion) is equal in magnitude but opposite in sign to the enthalpy of the reaction [12]. A fuel with a higher heating value can offer an extended transportation distance with a smaller storage fuel tank, while also providing greater power output from a smaller engine [13]. The cetane number defines the ignition quality of a diesel fuel and affects the ignition delay, making it a crucial factor in determining various diesel engine operating characteristics (fuel conversion efficiency, smoothness operation, misfire, noise levels, emissions, and ease of starting) [14]. The use of a fuel with a lower cetane number results in a longer ignition delay, higher rates of pressure rise, and higher peak pressures. Moreover, a lower cetane number results in incomplete combustion, reduced engine performance, and poor fuel conversion efficiency. On the other hand, the use of a fuel with a higher cetane number results in a shorter ignition delay, and smoother engine operation [14].

To determine the cetane number of a fuel, a standardized single-cylinder, variable compression ratio engine is used along with specialized loading and accessory equipment and instrumentation. The diesel engine is operated under the specified conditions (the engine speed: 900 rpm; the injection timing: 13 crank angle degree before the top dead center; injection pressure: 10.3 MPa, etc.) [14]. Measurement of the cetane number of a fuel through conventional testing equipment can be both labor-intensive and expensive. That is why establishing a predictive correlation represents a significant undertaking to reduce the amount of experimental effort required. In this context, in the existing literature, correlations to predict cetane number of pure biodiesels from their properties (based on the composition of fatty acid esters, the number of carbon atoms, the number of double bonds, the molecular weight of the fatty acid esters, the chain length, the saponification number, the iodine value, etc.) using different techniques (multiple linear regression, machine learning methods, group contribution methods, etc.) and correlations that are not compared with others have been presented in recent years [15-21]. However, the determination of some of these chemical properties can be expensive. Few studies have derived correlations for predicting the cetane number of pure biodiesels based on other fuel properties with the use of multiple non-linear regressions by comparing with multiple linear regression. Therefore, to fill the gap, correlations are

derived based on the density, kinematic viscosity, flash point, and heating value to predict cetane number of pure biodiesels using multiple non-linear regression models in this study. Then, the predictive capabilities of derived non-linear correlations are compared to the multiple linear correlation previously suggested in the literature. In other words, the importance of the study is that it can offer an alternative approach for predicting the cetane number of pure biodiesels depending on density, kinematic viscosity, flash point, and heating value rather than chemical properties, considering some difficulties in experimentally determining the cetane number.

2 Material and methods

2.1 Fuel property data

In this study, to develop predictive correlations, the density, kinematic viscosity, flash point, heating value, and cetane number data of different 100 biodiesels (methyl ester and ethyl ester) measured by various authors are collected from the literature [22-105]. The fuel properties measured by various researchers are listed in Tables 1-3. The density and kinematic viscosity are measured by various researchers at 15°C and 40°C, respectively. The density (EN ISO 12185, ASTM D-1298, ASTM D-4052, ASTM D-941), kinematic viscosity (EN ISO 3104, ASTM D-445), flash point (EN ISO 3679, UNE 51-023-90, ASTM D-92/93), heating value (ASTM D-240, ASTM D-4809, ASTM D-224, ASTM D-4868, ASTM D-5865), and cetane number (EN 5165, ASTM D-976, ASTM D-613, ASTM D-13) are measured by various researchers according to international standards.

2.2 Multiple correlations

The primary objective of regression analysis is to establish a meaningful association between a dependent variable and one or more independent variables [106]. Multiple correlations offer an examination of the connections between two or more independent variables, and a single dependent variable. Multiple correlations are highly useful in experimental and numerical studies in which more than one key independent variable influences the response [107]. In this study, to predict cetane number (CN) of pure biodiesels, the correlations depending on density (DS, kg/m³), kinematic viscosity (KV, mm²/s), flash point (FP, °C), and heating value (HV, MJ/kg) are derived using multiple non-linear regression by using NCSS software [108]. The fuel property data given in Table 1 are used for the derivation of the correlations, as shown in Equation (1), Equation (2), and Equation (3). In other words, to determine the regression constants in Equation (1), Equation (2), and Equation (3), the fuel property data in Table 1 are used. Equation (3) is derived using the multiple linear regression method previously suggested in the literature [15, 18, 109] to compare with the predictive capabilities of non-linear Equation (1) and Equation (2). The forms of multiple non-linear and linear correlations, including the combination of elements without an interaction term, are given as follows:

$$\begin{aligned}
 \text{CN} = & -21.3112599332018 \cdot \text{DS} - 2312.31524541451 \cdot \text{KV} \\
 & + 37.2533354365478 \cdot \text{FP} \\
 & + 547.451387881977 \cdot \text{HV} \\
 & + 0.0290418849516043 \cdot \text{DS}^2 \\
 & + 3.07779409006598 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \\
 & - 0.0301348940346684 \cdot \text{DS} \cdot \text{FP} \\
 & - 0.408104995235988 \cdot \text{DS} \cdot \text{HV} \\
 & + 46.8827777140952 \cdot \text{KV}^2 \\
 & + 2.26385245460417 \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & + 29.38975618004 \cdot \text{KV} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.017789067470411 \cdot \text{FP}^2 \\
 & - 1.32139763140522 \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & - 7.67747467892404 \cdot \text{HV}^2 \\
 & - 5.38392849642564E - 06 \cdot \text{DS}^3 \\
 & - 0.00119595487066825 \cdot \text{DS}^2 \cdot \text{KV} \\
 & - 9.65432622352794E - 06 \cdot \text{DS}^2 \cdot \text{FP} \\
 & - 0.000192907451768466 \cdot \text{DS}^2 \cdot \text{HV} \\
 & - 0.0539751962101155 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV}^2 \\
 & - 0.000880107527035711 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & - 0.00870194860872772 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{HV} \\
 & - 1.09029992191965E - 06 \cdot \text{DS} \cdot \text{FP}^2 \\
 & + 0.00128628761880498 \cdot \text{DS} \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & + 0.00685210780041322 \cdot \text{DS} \cdot \text{HV}^2 \\
 & + 0.348452053904228 \cdot \text{KV}^3 \\
 & + 0.00184997365599729 \cdot \text{KV}^2 \cdot \text{FP} \\
 & - 0.131721733718501 \cdot \text{KV}^2 \cdot \text{HV} \\
 & - 0.00119659718085975 \cdot \text{KV} \cdot \text{FP}^2 \\
 & - 0.0288451814081449 \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.206389277299603 \cdot \text{KV} \cdot \text{HV}^2 \\
 & + 6.80842374504503E - 06 \cdot \text{FP}^3 \\
 & + 0.000522476805678622 \cdot \text{FP}^2 \cdot \text{HV} \\
 & + 0.00205256926976448 \cdot \text{FP} \cdot \text{HV}^2 \\
 & + 0.0169718209195705 \cdot \text{HV}^3
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CN} = & -0.225871017644765 \cdot \text{DS} - 395.113643204447 \cdot \text{KV} \\
 & - 11.151475420594 \cdot \text{FP} \\
 & - 19.9678622836044 \cdot \text{HV} \\
 & + 0.511341386235934 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \\
 & + 0.0149330565935605 \cdot \text{DS} \cdot \text{FP} \\
 & + 0.0299268771561017 \cdot \text{DS} \cdot \text{HV} \\
 & + 4.88228371209204 \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & + 14.3452716405883 \cdot \text{KV} \cdot \text{HV} \\
 & + 0.405368189106296 \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.00601054507606774 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & - 0.0179026617259332 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.000518298783755752 \cdot \text{DS} \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.149726951787513 \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & + 0.000182135938485259 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & \cdot \text{HV}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CN} = & 0.0441923071176599 \cdot \text{DS} + 0.484872125545549 \cdot \text{KV} \\
 & + 0.0247426398693162 \cdot \text{FP} \\
 & + 0.221822286120976 \cdot \text{HV}
 \end{aligned} \tag{3}$$

3 Results and discussions

In this section, the predictive capabilities of non-linear and linear correlations are compared. Tables 1-3 list the measured cetane number data of pure biodiesels by different authors, and the relative errors between the measured cetane number data and the calculated cetane number values from the derived correlations. As shown in Tables 1-3, the density, kinematic viscosity, flash point, heating value, and cetane number data measured by different authors vary between 758-929.9 kg/m³, 1.921-15.5 mm²/s, 58-262.34°C, 34.50-45.63 MJ/kg, and 45-70, respectively. Compared to diesel fuel, the densities, kinematic viscosities, flash points, and cetane numbers of biodiesels are generally higher, whereas the heating values of biodiesels are lower. Due to the volumetric measurement of fuel injection into the

combustion chamber for diesel engines, the higher density of biodiesel leads to a higher mass flow rate for the same fuel volume, potentially leading to a rise in torque and output [110]. The higher viscosity of biodiesel contributes to poor fuel atomization and incomplete combustion, leading to engine deposits, poor engine performance, and exhaust emissions. Moreover, higher viscosity causes additional challenges under cold weather conditions. The higher flash point of biodiesel reduces the risks associated with handling and the potential fire hazards. The lower heating value of biodiesel generally results in higher specific fuel consumption. The higher cetane number of biodiesel can lead to a lower NO_x formation [111]. As listed in Table 1, for Equation (1), the maximum and the minimum relative errors are computed as 4.9879% and 0.0140%, respectively. The average relative error is computed as 1.6242%. The coefficient of determination (r²) and root mean square error (RMSE) are determined as 0.9996 and 1.4802, respectively. To use fewer terms than those in Equation (1) for practicality, Equation (2) is also derived. For Equation (2), r², RMSE, maximum relative error, minimum relative error, and average relative error are computed as 0.9976, 2.9039, 16.8686%, 0.1334%, and 3.8839%, respectively. The multiple linear correlation (Equation (3)) gives the following regression results: the maximum relative error of 25.6210%, the minimum relative error of 0.1012%, the average relative error of 5.0562%, r² of 0.9955, and RMSE of 3.7080. According to the regression results, a significant and satisfactory agreement between the experimental data and the calculated values from Equation (1) is observed, compared to Equation (2) and Equation (3). Equation (3) gives the worst estimates of cetane number. Therefore, to improve the predictive capability of Equation (2), the measured cetane number data, where the high relative errors from Equation (2) are obtained in Table 1, are extracted. Then, Equation (4) is again derived using the remaining cetane number data using the multiple regression method as follows:

$$\begin{aligned}
 \text{CN} = & -0.496861577688628 \cdot \text{DS} - 213.561560511396 \cdot \text{KV} \\
 & - 17.2240864922622 \cdot \text{FP} \\
 & - 40.5165814219249 \cdot \text{HV} \\
 & + 0.343580765865512 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \\
 & + 0.0237023328304558 \cdot \text{DS} \cdot \text{FP} \\
 & + 0.0597890292658327 \cdot \text{DS} \cdot \text{HV} \\
 & + 5.87261376391831 \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & + 13.749174866194 \cdot \text{KV} \cdot \text{HV} \\
 & + 0.667248830977058 \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.00739238512318715 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & - 0.0181139565650781 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.000861464488779323 \cdot \text{DS} \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & - 0.195981897863396 \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \cdot \text{HV} \\
 & + 0.000240785011170922 \cdot \text{DS} \cdot \text{KV} \cdot \text{FP} \\
 & \cdot \text{HV}
 \end{aligned} \tag{4}$$

As listed in Table 2, for Equation (4), r², RMSE, maximum relative error, minimum relative error, and average relative error are computed to be 0.9994, 1.4819, 4.9556%, 0.0509%, and 1.9436%, respectively. According to the regression results, the predictive capability of Equation (4) is considered to be better than Equation (2).

Finally, to compare the predictive capabilities of Equation (1) and Equation (4), cetane number data different from those given in Table 1 and Table 2 are used, as shown in Table 3. The minimum, maximum, and average relative errors are determined to be 0.2038%, 4.9695%, 2.2582% for Equation (1), and 0.3731%, 4.7636%, 1.8677% for Equation (4). Figure 1 shows the distribution of relative errors coming from Equation (1) and Equation (4). These regression results and Figure 1 indicate that Equation (4), depending on DS, KV, FP, and HV, is the best predictor for cetane number of pure biodiesels. In other words, the regression results demonstrate the superior effectiveness of Equation (4) in estimating cetane number. This can be attributed to the fact that the structures of terms in Equation (4) better reflect the effect of the fuel properties on the change of cetane number. Moreover, Equation (1) can be thought to be an alternative to Equation (4) owing to the close error and r^2 values of Equation (1) to Equation (4), which shows the structures of terms in Equation (1) adequately reflect the effect of the fuel properties on the change of cetane number.

4 Conclusions

Measurements of biodiesel properties (especially cetane number) can require significant expense and effort. Consequently, presenting predictive correlations is not only valuable for predicting fuel properties but also for enhancing the production of superior biodiesel. Hence, it is essential to propose reliable correlations to predict these properties. In this study, the relationship between cetane number and other vital fuel properties is determined. Multiple non-linear regression is used for the formulation of the predictive correlations for the cetane number of pure biodiesels depending on other fuel properties (density, kinematic viscosity, flash point, and heating value). The fuel property data of different biodiesels are collected from the literature measured by various authors. The predictive performances of the derived correlations (Equations 1-4) are investigated

by computing the regression parameters. The main conclusions are as follows:

Equation (1) yields a maximum relative error of 4.9879% and a minimum relative error of 0.0140%. The average relative error, r^2 , and RMSE are determined to be 1.6242%, 0.9996, and 1.4802, as shown in Table 1.

Regarding Equation (2), the regression results are computed as follows: $r^2 = 0.9976$, RMSE = 2.9039, maximum relative error = 16.8686%, minimum relative error = 0.1334%, and average relative error = 3.8839%, as shown in Table 1.

The multiple linear correlation (Equation (3)) yields a maximum relative error of 25.6210%, a minimum relative error of 0.1012%, an average relative error of 5.0562%, $r^2 = 0.9955$, and RMSE of 3.7080, as shown in Table 1.

Calculation of Equation (4) yields the following values: $r^2 = 0.9994$, RMSE = 1.4819, with a maximum relative error of 4.9556%, a minimum relative error of 0.0509%, and an average relative error of 1.9436%, as indicated in Table 2.

For the cetane number data given in Table 3, which are different from Tables 1 and 2, the minimum, maximum, and average relative errors are calculated as 0.2038%, 4.9695%, and 2.2582% for Equation (1); and 0.3731%, 4.7636%, and 1.8677% for Equation (4).

Finally, the regression outcomes underline that Equation (4), as functions of DS, KV, FP, and HV, emerges as the superior predictor for the cetane number of pure biodiesels. Alternatively, Equation (1) also shows a good agreement between the measured data and calculated values because of low relative errors than 5%. In other words, Equation (1) can be also suggested after Equation (4).

This study can contribute to researchers and institutions to develop better biodiesel fuel properties, which will result in enhanced engine performance and reduced exhaust emissions for diesel engines. Further improvement of the cetane number correlations can be obtained using machine learning methods, as a future study.

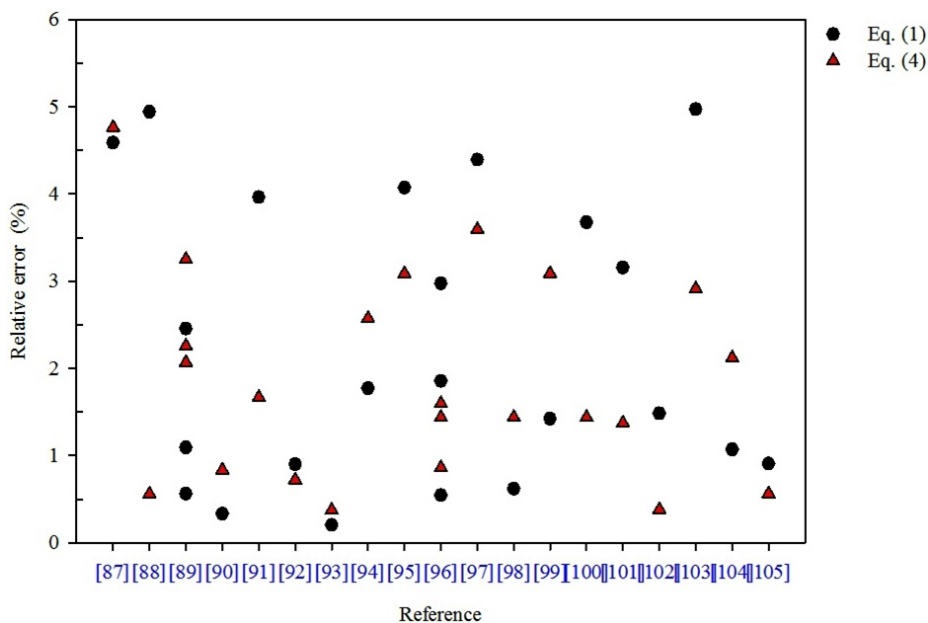


Figure 1. Distribution of relative errors

Table 1. Fuel properties measured by various authors and relative errors coming from Eq. (1), Eq. (2), and Eq. (3)

Biodiesel	Density (kg/m ³)	Viscosity (mm ² /s)	Flash point (°C)	Heating value (MJ/kg)	Cetane number	Relative error (%)		
						Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (3)
Turkey rendering fat [22]	885.8	4.49	178.1	40.68	52.4	3.1449	3.2142	4.4905
Algae [23]	887	4.23	146	41.24	53.49	4.1973	1.3170	0.9721
Peanut seed [24]	848.5	4.42	166	40.1	53.59	4.0163	1.9564	1.7678
Sesame seed [25]	867.2	4.2	170	40.4	50.48	2.9819	4.9794	6.0378
Lepidium sativum Linn. [26]	845	1.921	176	40.45	49.23	0.9183	4.3303	4.8169
High oleic sunflower [27]	876.6	4.74	167	40.47	53.2	1.3171	1.1758	1.7790
M. nigeriensis [28]	841	2.32	125	41.8	51.4	0.3810	7.1766	1.4482
Sunflower [29]	911	4.33	178.4	45.28	52.9	1.1245	1.9135	7.4043
Canola [30]	878	4.42	172.36	40.748	54	2.0661	0.9449	0.4582
Corn [30]	883	4.19	171	43.1	46.65	4.1690	10.9523	17.5669
Groundnut [30]	920	4.4	132	39.8	59.85	0.1939	8.3207	8.2959
Mustard [30]	879	5.53	169.16	40.4	56	0.8218	1.8407	2.3688
Olive pomace [30]	894	4.26	138	39.96	56.3	1.6855	4.6826	4.3482
Peanut [30]	878.5	4.69	176	35.33	58.24	2.1975	2.9553	8.5016
Rice bran [30]	881	4.4	175	40.87	51.15	3.6126	4.7232	6.4764
Safflower [30]	879	4.18	174	42.2	51.1	1.8920	2.2484	6.7278
Prunus avium [31]	838	3.543	160.56	37.65	50.1	2.5234	3.1708	1.9468
Canola [32]	833	4.7	120.5	38.363	46	0.0140	10.3754	9.9616
Yellow oleander [33]	890	4.81	142	40.42	55	0.6208	2.6091	1.5584
Palm [34]	874	4.7	176.5	39.82	56.3	2.6724	3.6250	3.9023
Semecarpus anacardium [35]	876	4.3	148	39	56	1.4127	4.4294	5.1600
Mesua ferrea [36]	888	4.4	156	38.86	58	0.7066	6.0830	7.1447
Karanja [37]	880.63	5.35	196.18	39.50	54.54	2.6525	2.7919	1.0765
Linseed [37]	886.27	4.76	262.34	38.148	51.24	0.4612	13.4541	10.1237
Reformulated-I [37]	871	3.2	238.61	39.136	60	0.0365	6.9130	8.9531
Jatropha [38]	835	4.8	125	42.97	51	0.9667	1.7907	1.6716
Shea nut butter [39]	877	4.42	171	37.93	58	2.2857	5.1793	7.6819
J. curcus [40]	875	4.97	175	38.83	59.05	3.1537	7.0322	8.5158

Table 1 (Continued)

Biodiesel	Density (kg/m ³)	Viscosity (mm ² /s)	Flash point (°C)	Heating value (MJ/kg)	Cetane number	Relative error (%)		
						Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (3)
Palm [41]	873	4.5	92	42.144	53	3.2636	3.2790	1.1573
Sesame seed [42]	870	3.9	158	37.60	52	4.0785	3.8981	1.1311
Sunflower [43]	885	4.6	92	43.10	47	1.3488	7.7449	13.1435
Spirulina microalgae [44]	861	5.26	128.2	41	52.2	2.6346	0.9308	1.2772
Waste cooking [45]	898	4.7	73	36.89	53	0.2529	2.4763	1.9758
Microalgae (Botryococcus) [46]	853	5.52	140	40.40	55.4	1.2106	3.8364	4.6965
Microalgae (Spirulina platensis) [47]	863.7	12.4	189	45.63	70	0.0250	0.2652	15.7437
Eruca sativa [48]	870	4.19	185	43.70	47.5	0.9511	7.3487	15.2630
Microalgae (Chlorella vulgaris) [48]	860	3.7	124	38.70	51.4	1.2266	1.2387	0.1012
Calophyllum inophyllum [49]	872	5.76	179	38.532	58.7	2.0528	5.5794	7.4877
Mahua [50]	882	4.2	170	38.5	57	1.5392	3.9801	5.6834
Hazelnut [51]	861.9	4.54	168	40.009	52.2	1.4104	2.0542	2.1500
Amoora [52]	866	4.67	154	38.3	55	0.6608	2.1095	3.9254
Thesz-Boros-Kiraly [53]	905	6.43	221	34.81	50.8	0.4979	0.9897	10.8298
Mango seed [54]	882	4.73	135	40.453	54	0.7566	1.8081	0.7691
Simarouba glauca [55]	865	4.68	165	38.5	56	1.1476	3.3157	5.1460
Waste cooking [56]	890	5.15	120	39	56	4.1545	4.5225	4.5564
Jatropha curcas [57]	864.8	4.723	182.5	40.536	51	3.0509	5.2178	5.9115
Brassica carinata [58]	879	4.5	110	36	52	0.9403	2.9341	0.5110
Pumpkin [59]	787	4.4	138	39.128	51	1.0864	4.8517	3.9084
Prosopis juliflora [59]	758	5.1	74	40.36	54.3	0.1015	0.9101	13.8963
Water hyacinth [60]	887	3.96	212	36.9	52.5	0.8021	9.8582	3.9035
Palm-sesame [61]	881	4.43	151	41.24	53.37	3.2949	0.9497	1.1158
Waste cooking [62]	883	4	120	39.5	52	4.1219	1.5696	1.3315
Soybean [63]	885	4.08	69	39.76	52	0.4868	0.3167	0.7397
Jatropha [64]	848.2	5	76	41.5	53	1.0375	1.6959	3.7843
Waste vegetable cooking [65]	880	4.15	176	37.73	55.1	1.7846	0.4819	2.6760
Rice bran [66]	876	4.46	213	42.21	55.7	1.2164	4.1931	0.3442
Waste cooking [67]	855	4.57	126	40.5	52	0.5830	0.4118	0.1955
Karanja [68]	900	9.6	114	35.9	54.53	0.0681	0.5430	1.2506
Yellow mustard [69]	877.84	5.413	164	39.931	57.23	0.7063	4.4900	5.0607
Unknown type mustard [69]	847	3.8	143	39.124	54	4.6418	5.5995	4.6478

Table 1 (Continued)

Biodiesel	Density (kg/m ³)	Viscosity (mm ² /s)	Flash point (°C)	Heating value (MJ/kg)	Cetane number	Relative error (%)		
						Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (3)
Kusum (ethyl ester) [70]	872	3.5	95	42.653	47	1.5803	10.0436	10.7334
Palm [71]	880	4.5	175	41.30	52	0.2877	2.7852	4.9276
Safflower [72]	870	3.9	187	40.26	53.14	1.1092	0.2717	1.4222
Trichosanthes cucumerina [73]	856	4.26	158	38.50	53	0.2087	0.1864	1.2384
Cotton seed [74]	864	4.14	128	36.80	52	0.9899	0.4194	0.9238
Cotton seed [75]	848	6.1	200	40.61	53	0.9413	0.1334	2.6217
Soybean [76]	890	4.5	58	37.405	45	0.3724	16.8686	13.8787
Castor bean [77]	920	12.5	135	40.5	47	0.1344	4.9116	25.6210
Castor [78]	929.9	15.5	146	41.17	60.2	0.0291	1.4712	1.9183
Microalgae [79]	885	4.2	191	40.10	54	1.7877	0.4475	1.4214
Palm [80]	872	4.5	94	39.80	53	1.7591	2.7654	2.1284
Mahua [81]	869	4.5	154	37.59	57	2.5198	5.0088	7.4847
Moringa oleifera [82]	869.6	5.05	150.5	40.05	56.3	2.1063	4.9315	4.9983
Jatropha [83]	865	5.2	175	34.50	51	0.7318	10.6896	3.3932
Jatropha [84]	876	4.5	121	38.789	55	0.1556	3.9392	4.5591
Simarouba [85]	868	4.8	165	39.80	52	4.9879	3.3898	3.0719
Pongamia [86]	898	5.46	196	39.15	57.9	2.0022	1.2110	3.5130

Table 2. Fuel properties measured by various authors and relative errors coming from Eq. (4)

Biodiesel	Density (kg/m ³)	Viscosity (mm ² /s)	Flash point (°C)	Heating value (MJ/kg)	Cetane number	Relative error (%)
Turkey rendering fat [22]	885.8	4.49	178.1	40.68	52.4	3.8418
Algae [23]	887	4.23	146	41.24	53.49	0.5897
Peanut seed [24]	848.5	4.42	166	40.1	53.59	2.5859
Sesame seed [25]	867.2	4.2	170	40.4	50.48	4.6276
Lepidium sativum Linn. [26]	845	1.921	176	40.45	49.23	1.0144
High oleic sunflower [27]	876.6	4.74	167	40.47	53.2	2.2712
Sunflower [29]	911	4.33	178.4	45.28	52.9	2.4563
Canola [30]	878	4.42	172.36	40.748	54	0.7279
Groundnut [30]	920	4.4	132	39.8	59.85	3.3228
Mustard [30]	879	5.53	169.16	40.4	56	0.3974
Olive pomace [30]	894	4.26	138	39.96	56.3	1.9089
Peanut [30]	878.5	4.69	176	35.33	58.24	3.0728
Rice bran [30]	881	4.4	175	40.87	51.15	4.8689
Safflower [30]	879	4.18	174	42.2	51.1	0.3180
Prunus avium [31]	838	3.543	160.56	37.65	50.1	2.3704
Yellow oleander [33]	890	4.81	142	40.42	55	0.4452
Palm [34]	874	4.7	176.5	39.82	56.3	2.3118
Semecarpus anacardium [35]	876	4.3	148	39	56	3.0276
Mesua ferrea [36]	888	4.4	156	38.86	58	3.9436
Karanja [37]	880.63	5.35	196.18	39.50	54.54	4.7769
Reformulated-I [37]	871	3.2	238.61	39.136	60	2.4265
Jatropha [38]	835	4.8	125	42.97	51	2.8806
Shea nut butter [39]	877	4.42	171	37.93	58	2.1726
J. curcus [40]	875	4.97	175	38.83	59.05	4.3962
Spirulina microalgae [44]	861	5.26	128.2	41	52.2	3.7367
Waste cooking [45]	898	4.7	73	36.89	53	0.5197
Microalgae (Botryococcus) [46]	853	5.52	140	40.40	55.4	0.7109
Microalgae (Spirulina platensis) [47]	863.7	12.4	189	45.63	70	0.0744
Eruca sativa [48]	870	4.19	185	43.70	47.5	0.5727
Microalgae (Chlorella vulgaris) [48]	860	3.7	124	38.70	51.4	4.7815
Calophyllum inophyllum [49]	872	5.76	179	38.532	58.7	1.8854
Mahua [50]	882	4.2	170	38.5	57	1.6641
Hazelnut [51]	861.9	4.54	168	40.009	52.2	2.5526
Amoora [52]	866	4.67	154	38.3	55	0.5119
Thesz-Boros-Kiraly [53]	905	6.43	221	34.81	50.8	0.7250
Mango seed [54]	882	4.73	135	40.453	54	0.8642

Table 2 (Continued)

Biodiesel	Density (kg/m ³)	Viscosity (mm ² /s)	Flash point (°C)	Heating value (MJ/kg)	Cetane number	Relative error (%)
Simarouba glauca [55]	865	4.68	165	38.5	56	0.6195
Waste cooking [56]	890	5.15	120	39	56	1.2927
Brassica carinata [58]	879	4.5	110	36	52	2.1310
Prosopis juliflora [59]	758	5.1	74	40.36	54.3	0.2805
Palm-sesame [61]	881	4.43	151	41.24	53.37	0.2496
Waste cooking [62]	883	4	120	39.5	52	2.8664
Soybean [63]	885	4.08	69	39.76	52	2.3552
Jatropha [64]	848.2	5	76	41.5	53	1.3917
Waste vegetable cooking [65]	880	4.15	176	37.73	55.1	3.9317
Waste cooking [67]	855	4.57	126	40.5	52	0.6018
Karanja [68]	900	9.6	114	35.9	54.53	0.1037
Yellow mustard [69]	877.84	5.413	164	39.931	57.23	1.9529
Palm [71]	880	4.5	175	41.30	52	2.5223
Safflower [72]	870	3.9	187	40.26	53.14	0.0833
Trichosanthes cucumerina [73]	856	4.26	158	38.50	53	1.5250
Palm [41]	873	4.5	92	42.144	53	1.0875
Cotton seed [74]	864	4.14	128	36.80	52	0.0509
Cotton seed [75]	848	6.1	200	40.61	53	1.9268
Castor bean [77]	920	12.5	135	40.5	47	1.4807
Castor [78]	929.9	15.5	146	41.17	60.2	0.7800
Microalgae [79]	885	4.2	191	40.10	54	0.9563
Palm [80]	872	4.5	94	39.80	53	1.1394
Mahua [81]	869	4.5	154	37.59	57	2.3177
Moringa oleifera [82]	869.6	5.05	150.5	40.05	56.3	2.8329
Jatropha [84]	876	4.5	121	38.789	55	2.5207
Simarouba [85]	868	4.8	165	39.80	52	4.9556
Pongamia [86]	898	5.46	196	39.15	57.9	1.1372

Table 3. Fuel properties measured by various authors and relative errors coming from Eq. (1) and Eq. (4) for the validation

Biodiesel	Density (kg/m ³)	Viscosity (mm ² /s)	Flash point (°C)	Heating value (MJ/kg)	Cetane number	Relative error (%)	
						Eq. (1)	Eq. (4)
Animal fats [87]	887	4.241	180	39.64062	58	4.5876	4.7636
Peanut [88]	883	4.9	176	41.71	54	4.9400	0.5573
Mahua [89]	869	4.90	136	39.95	56	2.4543	3.2504
Jatropha [89]	895	5.25	85	38.88	53	0.5620	2.0669
Jajoba [89]	895	5.05	85	38.88	53	1.0910	2.2565
Waste cooking [90]	879.4	4.651	172.5	36.49349	58.031	0.3324	0.8362
Safflower [91]	870	4.1	136	38.52	52	3.9624	1.6680
Kusum [92]	857	4.5	138.5	39.07	52.4	0.9002	0.7218
Canola [93]	881.1	4.63	163	40.102566	55	0.2038	0.3731
Grilled chicken waste [94]	876	4.3	177	39.9	53	1.7707	2.5737
Palm [95]	877	4.56	196	39.72	57.3	4.0708	3.0866
Corn [96]	885.8	4.363	167	39.87	55.4	0.5437	0.8595
Rapeseed [96]	884.9	4.585	177	39.9	54.5	1.8531	1.5957
Waste fried [96]	884.2	4.869	167	39.68	55	2.9739	1.4372
Fish (ethyl) [97]	885	4.741	114	40.057	52.6	4.3923	3.5919
Ceiba pentandra [98]	882	4.58	148	40.016	55.4	0.6190	1.4389
Cottonseed [99]	874	4.2	142	40.6	51.2	1.4218	3.0889
Palm [100]	859.2	4.6175	188.5	39.907	55	3.6746	1.4372
Camelina sativa [101]	872.6	5.01	159.5	40.86	55	3.1564	1.3731
Waste [102]	858	4.49	125	40.7	51.4	1.4821	0.3826
Rapeseed [103]	874	4.8	140	37.6	54	4.9695	2.9137
Jatropha [104]	869.2	4.75	180	40	53.5	1.0697	2.1201
Soapstock [105]	892.7	4.554	180.4	39.30	56.7	0.9076	0.5639

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 12

References

[1] J. Yan, S. Gao, W. Zhao and T. H. Lee, Study of combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel, butanol-diesel and hexanol-diesel mixtures under low intake pressure conditions.

Energy Conversion and Management, 243, 114273, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114273>
 [2] Z. G. Liu and A. Munnannur, Future diesel engines. Design and development of heavy duty diesel engines: A handbook, 887-914, 2020.
 [3] M. Z. Jacobson, Short-term effects of controlling fossil-fuel soot, biofuel soot and gases, and methane on climate, arctic ice, and air pollution health. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D14), 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JD013795>.

- [4] D. Adu-Mensah, D. Mei, L. Zuo, Q. Zhang and J. Wang, A review on partial hydrogenation of biodiesel and its influence on fuel properties. *Fuel*, 251, 660-668, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.036>.
- [5] M. Udayakumar, S. Sivaganesan and S. Sivamani, Process optimization of KOH catalyzed biodiesel production from crude sunflower-mahua oil. *Biofuels*, 13(8), 1031-1039, 2022. <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2071068>.
- [6] M. A. Shaah, F. Allafi, M. S. Hossain, A. Alsaedi, N. Ismail, M. O. A. Kadir and M. I. Ahmad, Candelnut oil: review on oil properties and future liquid biofuel prospects. *International Journal of Energy Research*, 45(12), 17057-17079, 2021. <https://doi.org/10.1002/er.6446>.
- [7] I. Raheem, M. N. B. Mohiddin, Y. H. Tan, J. Kannedo, N. M. Mubarak, M. O. Abdullah and M. L. Ibrahim, A review on influence of reactor technologies and kinetic studies for biodiesel application. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 91, 54-68, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.08.024>.
- [8] L. Zhang, B. Sheng, Z. Xin, Q. Liu and S. Sun, Kinetics of transesterification of palm oil and dimethyl carbonate for biodiesel production at the catalysis of heterogeneous base catalyst. *Bioresource Technology*, 101(21), 8144-8150, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.069>.
- [9] M. Mofijur, M. G. Rasul, J. Hyde, A. K. Azad, R. Mamat and M. M. K. Bhuiya, Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 265-278, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.046>.
- [10] P. McCarthy, M. G. Rasul and S. Moazzem, Analysis and comparison of performance and emissions of an internal combustion engine fuelled with petroleum diesel and different bio-diesels. *Fuel*, 90(6), 2147-2157, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.010>.
- [11] I. Barabás and I. A. Todorut, Predicting the temperature dependent viscosity of biodiesel–diesel–bioethanol blends. *Energy & Fuels*, 25(12), 5767-5774, 2011. <https://doi.org/10.1021/ef2007936>.
- [12] S. R. Turns, An introduction to combustion. Concepts and applications. Second Edition. McGraw-Hill International Editions, Mechanical Engineering Series. ISBN: 0-07-230096-5, 2000.
- [13] M. Gülüm and A. Bilgin, Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel–diesel fuel blends. *Fuel Processing Technology*, 134, 456-464, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.02.026>.
- [14] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill International Editions, Automotive Technology Series. ISBN: 0-07-100499-8, 1988.
- [15] V. Kumbhar, A. Pandey, C. R. Sonawane, A. S. El-Shafay, H. Panchal and A. J. Chamkha, Statistical analysis on prediction of biodiesel properties from its fatty acid composition. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101775, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101775>.
- [16] H. Yang, Z. Ring, Y. Briker, N. McLean, W. Friesen and C. Fairbridge, Neural network prediction of cetane number and density of diesel fuel from its chemical composition determined by LC and GC–MS. *Fuel*, 81(1), 65-74, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00121-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00121-1).
- [17] M. Gülüm, Multiple correlations to predict cetane number of pure biodiesels depending on other fuel properties. *Eurasia Research Conferences, Scientific and Technical Research Association (STRA) Conference Proceedings*, 2, 45, 2023.
- [18] R. Piloto-Rodríguez, Y. Sánchez-Borroto, M. Lapuerta, L. Goyos-Pérez and S. Verhelst, Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression. *Energy Conversion and Management*, 65, 255-261, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.023>.
- [19] S. F. Ardabili, B. Najafi and S. Shamshirband, Fuzzy logic method for the prediction of cetane number using carbon number, double bounds, iodine, and saponification values of biodiesel fuels. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(2), 584-599, 2019. <https://doi.org/10.1002/ep.12960>.
- [20] D. Tong, C. Hu, K. Jiang and Y. Li, Cetane number prediction of biodiesel from the composition of the fatty acid methyl esters. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 88(3), 415-423, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11746-010-1672-0>.
- [21] C. Y. Lin and X. E. Wu, Determination of cetane number from fatty acid compositions and structures of biodiesel. *Processes*, 10(8), 1502, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10081502>.
- [22] A. O. Emiroğlu, A. Keskin and M. Şen, Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Fuel*, 216, 266-273, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.026>.
- [23] T. Kalyani, L. S. V. Prasad and A. Kolakoti, Effect of triacetin as an oxygenated additive in algae biodiesel fuelled CI engine combustion, performance, and exhaust emission analysis. *Fuel*, 338, 127366, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127366>.
- [24] C. Kaya, C. Hamamci, A. Baysal, O. Akba, S. Erdogan and A. Saydut, Methyl ester of peanut (*Arachis hypogea* L.) seed oil as a potential feedstock for biodiesel production. *Renewable Energy*, 34(5), 1257-1260, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.002>.
- [25] A. Saydut, M. Z. Duz, C. Kaya, A. B. Kafadar and C. Hamamci, Transesterified sesame (*Sesamum indicum* L.) seed oil as a biodiesel fuel. *Bioresource Technology*, 99(14), 6656-6660, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.063>.
- [26] I. A. Nehdi, H. Sbihi, C. P. Tan and S. I. Al-Resayes, Garden cress (*Lepidium sativum* Linn.) seed oil as a potential feedstock for biodiesel production.

- Bioresource Technology, 126, 193-197, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.113>.
- [27] G. Martínez, N. Sánchez, J. M. Encinar and J. F. González, Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution. Biomass and Bioenergy, 63, 22-32, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.034>.
- [28] G. M. Kalu-Uka, S. Kumar, A. C. Kalu-Uka, S. Vikram, O. O. Okorafor, M. Kigozi, G. O. Ihekweze and A. P. Onwualu, Prospects for biodiesel production from *Macrotermes nigeriensis*: Process optimization and characterization of biodiesel properties. Biomass and Bioenergy, 146, 105980, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105980>.
- [29] B. B. Uzun, M. Kiliç, E. Apaydin-Varol and A. E. Pütün, Optimization of biodiesel production and fuel properties of blends. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 36(8), 898-906, 2014. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.549907>.
- [30] B. Sajjadi, A. A. A. Raman and H. Arandiyani, A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: Composition, specifications and prediction models. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 63, 62-92, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.035>.
- [31] A. Abdulvahitoğlu, Predicted fuel characteristics of prunus avium seed oil as a candidate for biodiesel production. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 8(4), 165-171, 2019. <https://doi.org/10.18245/ijaet.625754>.
- [32] G. Tüccar, E. Tosun and E. Uludamar, Investigations of effects of density and viscosity of diesel and biodiesel fuels on NO_x and other emission formations. Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 6(2), 81-85, 2018. <https://doi.org/10.21541/apjes.371015>.
- [33] A. R. Nasirudeen, D. Lasisi, L. A. Balogun, A. J. Eebo, F. O. Ogunsola, A. J. Adesope, S. O. Ogundare, F. A. Ola, Physico-chemical properties of yellow oleander (*Thevetia peruviana*) and their effects on the qualities of biodiesel. Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment, 15(4), 859-866, 2019.
- [34] M. Ozcanli and H. Serin, Evaluation of soybean/canola/palm biodiesel mixture as an alternative diesel fuel. Journal of Scientific & Industrial Research, 70, 466-470, 2011.
- [35] M. Illipilla, S. V. P. Lankapalli and J. Sagari, Influence of dispersant-mixed TiO₂ nanoparticles on stability and physicochemical properties of *Semecarpus anacardium* biodiesel blend. International Nano Letters, 13(1), 53-62, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40089-022-00384-y>.
- [36] J. Kari, V. S. P. Vanthala and J. Sagari, The effect of a surfactant and dispersant mixed Cr₂O₃ nanoparticles on the analysis of stability and physicochemical properties of a *Mesua ferrea* biodiesel blend. Petroleum Science and Technology, 1-17, 2022. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2117381>.
- [37] V. Sharma and D. Ganesh, Combustion and emission characteristics of reformulated biodiesel fuel in a single-cylinder compression ignition engine. International Journal of Environmental Science and Technology, 17, 243-252, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02285-8>.
- [38] K. Srithar and K. A. Balasubramanian, Dual biodiesel for diesel engine-Property, performance and emission analysis. International Energy Journal, 14(3), 107-120, 2014.
- [39] C. C. Enweremadu and O. J. Alamu, Development and characterization of biodiesel from shea nut butter. International Agrophysics, 24(1), 29-34, 2010.
- [40] T. T. Kivevele and Z. Huan, Effects of antioxidants on the cetane number, viscosity, oxidation stability, and thermal properties of biodiesel produced from nonedible oils. Energy Technology, 1(9), 537-543, 2013. <https://doi.org/10.1002/ente.201300072>.
- [41] M. M. Musthafa, Development of performance and emission characteristics on coated diesel engine fuelled by biodiesel with cetane number enhancing additive. Energy, 134, 234-239, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.012>.
- [42] J. Pullen and K. Saeed, Factors affecting biodiesel engine performance and exhaust emissions-Part I. Energy, 72, 1-16, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.015>.
- [43] M. Mourad, K. R. Mahmoud and E. S. H. NourEldeen, Improving diesel engine performance and emissions characteristics fuelled with biodiesel. Fuel, 302, 121097, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121097>.
- [44] U. Rajak, P. Nashine and T. N. Verma, Assessment of diesel engine performance using spirulina microalgae biodiesel. Energy, 166, 1025-1036, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.098>.
- [45] P. M. Shameer and K. Ramesh, Experimental evaluation on performance, combustion behavior and influence of in-cylinder temperature on NO_x emission in a DI diesel engine using thermal imager for various alternate fuel blends. Energy, 118, 1334-1344, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.017>.
- [46] V. Ashokkumar, E. Agila, P. Sivakumar, Z. Salam, R. Rengasamy and F. N. Ani, Optimization and characterization of biodiesel production from microalgae *Botryococcus* grown at semi-continuous system. Energy Conversion and Management, 88, 936-946, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.019>.
- [47] S. S. Mostafa and N. S. El-Gendy, Evaluation of fuel properties for microalgae *Spirulina platensis* bio-diesel and its blends with Egyptian petro-diesel. Arabian Journal of Chemistry, 10, S2040-S2050, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.arabjch.2013.07.034>.
- [48] S. Tayari, R. Abedi and A. Rahi, Comparative assessment of engine performance and emissions fuelled with three different biodiesel generations. Renewable Energy, 147, 1058-1069, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.068>.
- [49] C. M. Kshirsagar and R. Anand, Artificial neural network applied forecast on a parametric study of

- Calophyllum inophyllum methyl ester-diesel engine out responses. *Applied Energy*, 189, 555- 567, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.045>.
- [50] N. Acharya, P. Nanda, S. Panda and S. Acharya, Analysis of properties and estimation of optimum blending ratio of blended mahua biodiesel. *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 20(2), 511-517, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.12.005>.
- [51] Ş. Efe, M. A. Ceviz and H. Temur, Comparative engine characteristics of biodiesels from hazelnut, corn, soybean, canola and sunflower oils on DI diesel engine. *Renewable Energy*, 119, 142-151, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.011>.
- [52] J. Kakati, T. K. Gogoi and K. Pakshirajan, Production of biodiesel from Amari (Amoora Wallichii King) tree seeds using optimum process parameters and its characterization. *Energy Conversion and Management*, 135, 281-290, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.087>.
- [53] G. Szabados and Á. Bereczky, Experimental investigation of physicochemical properties of diesel, biodiesel and TBK-biodiesel fuels and combustion and emission analysis in CI internal combustion engine. *Renewable Energy*, 121, 568-578, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.048>.
- [54] K. Velmurugan, A. P. Sathiyagnanam, Impact of antioxidants on NO_x emissions from a mango seed biodiesel powered DI diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 715-722, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.004>.
- [55] S. R. Mishra, M. K. Mohanty, N. A. Panigrahi and A. K. Pattanaik, Impact of Simarouba glauca biodiesel blends as a fuel on the performance and emission analysis in an unmodified DICI engine. *Renewable Energy Focus*, 26, 11-16, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.05.002>.
- [56] X. Zhang, R. Yang, P. Anburajan, Q. Van Le, M. Alsehli, C. Xia and K. Brindhadevi, Assessment of hydrogen and nanoparticles blended biodiesel on the diesel engine performance and emission characteristics. *Fuel*, 307, 121780, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121780>.
- [57] M. Mofijur, H. H. Masjuki, M. A. Kalam and A. E. Atabani, Evaluation of biodiesel blending, engine performance and emissions characteristics of Jatropa curcas methyl ester: Malaysian perspective. *Energy*, 55, 879-887, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.059>.
- [58] M. Cardone, M. V. Prati, V. Rocco, M. Seggiani, A. Senatore and S. Vitolo, Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: engine performance and regulated and unregulated exhaust emissions. *Environmental Science & Technology*, 36(21), 4656-4662, 2002. <https://doi.org/10.1021/es011078y>.
- [59] V. K. Viswanathan, A. R. Kaladgi, P. Thomai, Ü. Ağbulut, M. Alwetaishi, Z. Said, S. Shaik and A. Afzal, Hybrid optimization and modelling of CI engine performance and emission characteristics of novel hybrid biodiesel blends. *Renewable Energy*, 198, 549-567, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.008>.
- [60] K. Alagu, H. Venu, J. Jayaraman, V. D. Raju, L. Subramani, P. Appavu and S. Dhanasekar, Novel water hyacinth biodiesel as a potential alternative fuel for existing unmodified diesel engine: Performance, combustion and emission characteristics. *Energy*, 179, 295-305, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.207>.
- [61] M. A. Mujtaba, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, F. Noor, M. Farooq, H. C. Ong, M. Gul, M. E. M. Soudagar, S. Bashir, I. M. R. Fattah and L. Razzaq, Effect of additivized biodiesel blends on diesel engine performance, emission, tribological characteristics, and lubricant tribology. *Energies*, 13(13), 3375, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13133375>.
- [62] M. S. Gad and M. A. Ismail, Effect of waste cooking oil biodiesel blending with gasoline and kerosene on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.040>.
- [63] A. K. Azad, M. G. Rasul, B. Giannangelo and R. Islam, Comparative study of diesel engine performance and emission with soybean and waste oil biodiesel fuels. *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering*, 12, 2866-2881, 2015. <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.12.2015.6.0241>.
- [64] M. S. Gad, A. S. El-Shafay and H. A. Hashish, Assessment of diesel engine performance, emissions and combustion characteristics burning biodiesel blends from jatropha seeds. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 518-526, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.034>.
- [65] A. Shirneshan, B. H. Samani and B. Ghobadian, Optimization of biodiesel percentage in fuel mixture and engine operating conditions for diesel engine performance and emission characteristics by artificial bees colony algorithm. *Fuel*, 184, 518-526, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.117>.
- [66] J. Dharmaraja, D. D. Nguyen, S. Shobana, G. D. Saratale, S. Arvindnarayan, A. E. Atabani, S. W. Chang and G. Kumar, Engine performance, emission and bio characteristics of rice bran oil derived biodiesel blends. *Fuel*, 239, 153-161, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.123>.
- [67] N. Yilmaz and M. Ukaoma, Impact of biodiesel and propanol blends on engine performance, regulated emissions and PAH formation. *International Journal of Energy Research*, 46(15), 23433-23448, 2022. <https://doi.org/10.1002/er.8640>.
- [68] K. Sivaramkrishnan and P. Ravikumar, Performance optimization of karanja biodiesel engine using taguchi approach and multiple regressions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(4), 506-516, 2012.

- [69] V. Aslan, Fuel characterization, engine performance characteristics and emissions analysis of different mustard seed biodiesel: An overview. *Journal of Biotechnology*, 370, 12-30, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.05.006>.
- [70] T. Agrawal, R. Gautam, S. Agrawal, V. Singh, M. Kumar and S. Kumar, Optimization of engine performance parameters and exhaust emissions in compression ignition engine fueled with biodiesel-alcohol blends using taguchi method, multiple regression and artificial neural network. *Sustainable Futures*, 2, 100039, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100039>.
- [71] D. Singh, D. Sharma, S. L. Soni, C. S. Inda, S. Sharma, P. K. Sharma and A. Jhalani, A comprehensive review on 1st-generation biodiesel feedstock palm oil: production, engine performance, and exhaust emissions. *BioEnergy Research*, 14, 1-22, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10171-2>.
- [72] R. R. Al-Samarrae, A. E. Atabani, G. Uguz, G. Kumar, O. Arpa, A. Ayanoglu, M. N. Mohammed and H. Farouk, Perspective of safflower (*Carthamus tinctorius*) as a potential biodiesel feedstock in Turkey: characterization, engine performance and emissions analyses of butanol-biodiesel-diesel blends. *Biofuels*, 11(6), 715-731, 2020. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1398956>.
- [73] R. Manimaran, T. Mohanraj, M. Venkatesan, R. Ganesan and D. Balasubramanian, A computational technique for prediction and optimization of VCR engine performance and emission parameters fuelled with *Trichosanthes cucumerina* biodiesel using RSM with desirability function approach. *Energy*, 254, 124293, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124293>.
- [74] S. J. M. Algayyim, A. P. Wandel, T. Yusaf and S. Al-Lwayzy, Butanol-acetone mixture blended with cottonseed biodiesel: Spray characteristics evolution, combustion characteristics, engine performance and emission. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(4), 4729-4739, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.08.035>.
- [75] A. S. Kumara, D. Maheswarb and K. V. K. Reddy, Comparison of diesel engine performance and emissions from neat and transesterified cotton seed oil. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 3(3), 190 - 197, 2009.
- [76] V. Narasiman, S. Jeyakumar and M. Mani, Experimental investigation of DI diesel engine performance with oxygenated additive and SOME biodiesel. *Journal of Thermal Science and Technology*, 10(1), JTST0014-JTST0014, 2015. <https://doi.org/10.1299/jtst.2015jtst0014>.
- [77] C. Rekhate and A. K. Prajapati, Production, engine performance, combustion, emission characteristics and economic feasibility of biodiesel from waste cooking oil: A review. *Environmental Quality Management*, 29(1), 7-35, 2019. <https://doi.org/10.1002/tqem.21645>.
- [78] A. M. Attia, M. Nour and S. A. Nada, Study of Egyptian castor biodiesel-diesel fuel properties and diesel engine performance for a wide range of blending ratios and operating conditions for the sake of the optimal blending ratio. *Energy Conversion and Management*, 174, 364-377, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.016>.
- [79] A. Tizvir, G. R. Molaeimanesh, A. R. Zahedi and S. Labbafi, Optimization of biodiesel production from microalgae and investigation of exhaust emissions and engine performance for biodiesel blended. *Process Safety and Environmental Protection*, 175, 319-340, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.056>.
- [80] S. N. K. Reddy and M. M. Wani, Engine performance and emission studies by application of nanoparticles as additive in biodiesel diesel blends. *Materials Today: Proceedings*, 43, 3631-3634, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.832>.
- [81] S. R. Pala, V. S. P. Vanthala and J. Sagari, The effect of metallic and nonmetallic oxide nanoparticles dispersed Mahua biodiesel on diesel engine performance and emission characteristics. *Petroleum Science and Technology*, 1-18, 2023. <https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2190778>.
- [82] M. Mofijur, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. E. Atabani, I. R. Fattah and H. M. Mobarak, Comparative evaluation of performance and emission characteristics of *Moringa oleifera* and Palm oil based biodiesel in a diesel engine. *Industrial Crops and Products*, 53, 78-84, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.011>.
- [83] E. K. Mohammed and M. A. Nemit-Allah, Experimental investigations of ignition delay period and performance of a diesel engine operated with *Jatropha* oil biodiesel. *Alexandria Engineering Journal*, 52(2), 141-149, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.12.006>.
- [84] M. S. Gad and S. Jayaraj, A comparative study on the effect of nano-additives on the performance and emissions of a diesel engine run on *Jatropha* biodiesel. *Fuel*, 267, 117168, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117168>.
- [85] S. Pai, A. Sharief and S. Kumar, Influence of ultra injection pressure with dynamic injection timing on CRDI engine performance using Simarouba biodiesel blends. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15(4), 5748-5759, 2018. <https://doi.org/10.15282/ijame.15.4.2018.3.0440>.
- [86] S. Jaichandar and K. Annamalai, Effects of open combustion chamber geometries on the performance of pongamia biodiesel in a DI diesel engine. *Fuel*, 98, 272-279, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.004>.
- [87] S. Simsek and S. Uslu, Comparative evaluation of the influence of waste vegetable oil and waste animal oil-based biodiesel on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 280, 118613, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118613>.
- [88] K. Sivaramakrishnan and P. Ravikumar, Determination of cetane number of biodiesel and its influence on

- physical properties. ARPN journal of engineering and applied sciences, 7(2), 205-211, 2012.
- [89] H. Venkatesan, S. Sivamani, S. Sampath, V. Gopi, and D. Kumar, A comprehensive review on the effect of nano metallic additives on fuel properties, engine performance and emission characteristics. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 7(2), 825-843, 2017.
- [90] I. Örs, S. Sarikoç, A. E. Atabani, S. Ünalın and S. O. Akansu, The effects on performance, combustion and emission characteristics of DIC engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. Fuel, 234, 177-188, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.024>.
- [91] H. Karabaş and S. Boran, Comparison of engine performance and exhaust emission properties of diesel and safflower biodiesel using multi-response surface methodology. Environmental Progress & Sustainable Energy, 38(3), e13034, 2019. <https://doi.org/10.1002/ep.13034>.
- [92] A. K. Yadav, M. E. Khan, A. M. Dubey and A. Pal, Performance and emission characteristics of a transportation diesel engine operated with non-edible vegetable oils biodiesel. Case Studies in Thermal Engineering, 8, 236-244, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.08.001>.
- [93] H. Özgünay, S. Çolak, G. Zengin, Ö. Sari, H. Sarikahya and L. Yüceer, Performance and emission study of biodiesel from leather industry pre-fleshings. Waste Management, 27(12), 1897-1901, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.014>.
- [94] W. H. Al Doori, A. H. Ahmed and H. Kotein, Comparative study of biodiesel production from different waste oil sources for optimum operation conditions and better engine performance. Journal of Thermal Engineering, 8(4), 457-465, 2021. <https://doi.org/10.18186/thermal.1135266>.
- [95] J. C. Ge, H. Y. Kim, S. K. Yoon and N. J. Choi, Optimization of palm oil biodiesel blends and engine operating parameters to improve performance and PM morphology in a common rail direct injection diesel engine. Fuel, 260, 116326, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116326>.
- [96] B. F. Lin, J. H. Huang and D. Y. Huang, Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions. Fuel, 88(9), 1779-1785, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.04.006>.
- [97] S. Gnanasekaran, N. Saravanan and M. Ilangkumaran, Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on fish oil biodiesel. Energy, 116, 1218-1229, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.039>.
- [98] N. Panneerselvam, A. Murugesan, K. P. Porkodi, T. Jima, C. Vijayakumar and D. Subramaniam, Computational engine performance and emission analysis using Ceiba pentandra biodiesel. Biofuels, 7(3), 201-206, 2016. <https://doi.org/10.1080/17597269.2015.1123985>.
- [99] P. Rajendra, J. Kamalesh, G. Pranali, B. Vishal and S. Bhushan, A comprehensive review on influence of biodiesel and additives on performance and emission of diesel engine. Chemical Engineering Transactions, 65, 451-456, 2018. <https://doi.org/10.3303/CET1865076>.
- [100] M. I. Arbab, M. Varman, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, S. Imtenan, H. Sajjad and I. R. Fattah, Evaluation of combustion, performance, and emissions of optimum palm-coconut blend in turbocharged and non-turbocharged conditions of a diesel engine. Energy Conversion and Management, 90, 111-120, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.017>.
- [101] B. A. Oni and D. Oluwatosin, Emission characteristics and performance of neem seed (Azadirachta indica) and camelina (Camelina sativa) based biodiesel in diesel engine. Renewable Energy, 149, 725-734, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.012>.
- [102] A. Atmanli and N. Yilmaz, An experimental assessment on semi-low temperature combustion using waste oil biodiesel/C3-C5 alcohol blends in a diesel engine. Fuel, 260, 116357, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116357>.
- [103] L. A. Raman, B. Deepanraj, S. Rajakumar and V. Sivasubramanian, Experimental investigation on performance, combustion and emission analysis of a direct injection diesel engine fuelled with rapeseed oil biodiesel. Fuel, 246, 69-74, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.106>.
- [104] M. J. Abedin, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Sanjid, S. A. Rahman and I. R. Fattah, Performance, emissions, and heat losses of palm and jatropha biodiesel blends in a diesel engine. Industrial Crops and Products, 59, 96-104, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.001>.
- [105] E. Öztürk, Performance, emissions, combustion and injection characteristics of a diesel engine fuelled with canola oil-hazelnut soapstock biodiesel mixture. Fuel Processing Technology, 129, 183-191, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.016>.
- [106] J. Neter, W. Wasserman and M. H. Kutner, Applied linear regression models. Irwin, Second Edition. ISBN: 0-256-07068-7, 1989.
- [107] R. Peck, C. Olsen and J. Devore, Introduction to statistics and data analysis. Thomson Learning Academic Resource Center. ISBN: 0-534-37092-6, 2001.
- [108] J. L. Hintze, NCSS User's Guide III Regression and Curve Fitting. NCSS Statistical System, 2007. <https://www.ncss.com/download/ncss/manuals/>, Accessed: 01.08.2023.
- [109] A. I. Bamgboye and A. C. Hansen, Prediction of cetane number of biodiesel fuel from the fatty acid methyl ester (FAME) composition. International Agrophysics, 22(1), 21-29, 2008.
- [110] N. Usta, An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. Energy Conversion and

Management, 46(15-16), 2373-2386, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.002>.
[111] M. Mohamed, C. K. Tan, A. Fouda, M. S. Gad, O. Abu-Elyazeed and A. F. Hashem, Diesel engine performance, emissions and combustion characteristics

of biodiesel and its blends derived from catalytic pyrolysis of waste cooking oil. *Energies*, 13(21), 5708, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13215708>.





Farklı döküm yöntemleriyle üretilen Zn-%1Mg alaşımının mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerinin karşılaştırılması

Comparison of microstructure, mechanical and corrosion properties of Zn-%1Mg alloy produced by different casting methods

Selma Özarslan^{1,*} 

¹ Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 31034, Hatay, Türkiye

Öz

Zn alaşımları sahip oldukları yüksek biyouyumluluk, nispeten yavaş (biyobozunur Mg ve Fe'ye göre) bozunma hızı ve yüksek mukavemetleri nedeniyle son zamanlarda biyobozunur malzeme arayışında dikkat çekmeye başlamıştır. Özellikle farklı elementler ile alaşımlama yapılarak Zn esaslı alaşımların mekanik ve korozyon özellikleri incelenmektedir. Bu çalışmada Zn-%1 Mg alaşımları; gravite (yerçekimi) döküm, manyetik alan altında gravite döküm ve yüksek basınçlı döküm (HPDC) yöntemi olmak üzere üç farklı döküm yöntemiyle üretilerek mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri karşılaştırılmıştır. Her üç döküm yönteminde de Zn dendritik matris fazının ve Mg₂Zn₁₁ ötektik yapının oluştuğu tespit edilmiştir. Katılaşma anında manyetik alan uygulanmasının dendritik ve ötektik yapıyı incelttiği olduğu görülmüştür. Gravite dökümde katılaşma anında manyetik alan uygulanmasının Zn-Mg alaşımının mekanik ve korozyon özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. En yüksek Vickers sertlik değeri yüksek basınçlı döküm yöntemi ile elde edilirken, en düşük korozyon hızı manyetik alan altında gerçekleştirilen gravite döküm numunesinde elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyomalzemeler, Çinko alaşımları, Mikroyapı, Manyetik alan, Katılaşırma

1 Giriş

Günümüzde biyomalzeme alanındaki araştırmalar malzeme biliminin teknoloji ile birlikte ilerlemesiyle oldukça hız kazanmıştır. Özellikle son yıllarda biyobozunur malzemelerin kullanım alanının genişlemesiyle yeni malzeme arayışları; üretim metodolojisi ve alaşımlama teknikleri üzerine yoğunlaşmıştır [1]. Geçici implant uygulamalarında oldukça ilgi gören magnezyum ve magnezyum alaşımları yüksek biyouyumluluğuna rağmen yüksek korozyon hızı ve bozunma esnasında mekanik dayanımdaki hızlı düşüş halen üzerinde tartışılan bir sorun olarak durmaktadır [2,3]. Bu nedenle, son yıllarda araştırmacılar biyobozunur Mg alaşımlarına alternatif olarak Zn ve Fe esaslı malzemeler üzerine yoğunlaşmışlardır [4]. Fe esaslı malzemeler sahip oldukları mekanik özellikler nedeniyle ortopedik uygulamalardan ziyade kardiyovasküler uygulamalar için uygun görülmüş ve stent olarak kullanımı

Abstract

Zn alloys have recently attracted attention in the search for biodegradable materials due to their high biocompatibility, moderate (compared to biodegradable Mg and Fe) degradation rate, and high strength. In particular, the mechanical and corrosion properties of Zn-based alloys are investigated by alloying with different elements. In this study, the Zn-1% Mg alloys were produced using three different casting methods: gravity casting, gravity casting under a magnetic field, and high-pressure casting (HPDC). Their microstructure, mechanical, and corrosion properties were compared. It was determined that the Zn dendritic matrix phase and Mg₂Zn₁₁ eutectic structure were formed in all three casting methods. It has been observed that applying a magnetic field at the time of solidification thins the dendritic and eutectic structures. It has been observed that applying a magnetic field during solidification in gravity casting improves the mechanical and corrosion properties of the Zn-Mg alloy. While the highest Vickers hardness value was obtained by the high pressure die casting method, the lowest corrosion rate was obtained in the gravity casting sample performed under a magnetic field.

Keywords: Biomaterials, Zinc alloys, Microstructure, Magnetic field, Solidification

tercih edilmiştir [5]. Fakat demirdeki korozyon ürünlerinin damar içerisinde 9 aydan daha fazla kalması halinde arter duvarında biriktiği gözlenmiştir [6,7]. Çinko; demir ve magnezyum arasında bir korozyon hızına sahiptir ve bozunma sırasında magnezyum alaşımlarında olduğu gibi aşırı H₂ gazı açığa çıkarmamaktadır. Aynı zamanda vücut için temel öğelerden biri olması çinkoyu, magnezyuma alternatif biyobozunur metalik alaşım yapmaktadır [8,9]. Fakat saf çinko metalik implantlar için gerekli olan mekanik özellikleri tam olarak karşılayamamaktadır [10]. Zn alaşımlarının mikroyapısı esas olarak bir matris fazı (α -Zn) ve genellikle sert ve kırılgan olan intermetalik fazlar olarak adlandırılan ikincil fazlar içerir. [11]. Zn alaşımlarının mekanik özellikleri, bu intermetalik fazlardan ve hacim fraksiyonlarından, boyutlarından ve Zn matrisindeki dağılımlarından önemli ölçüde etkilenir ve bu mikroyapısal özellikler üretim tekniğine, işleme yöntemlerine ve alaşım

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: selmaozarslan@gmail.com (S. Özarslan)
Geliş / Received: 22.08.2023 Kabul / Accepted: 27.09.2023 Yayımlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1348335

elementine doğrudan bağlıdır [12]. Saf çinkonun biyobozunur alaşım olarak tasarlanması sırasında ilave edilecek elementlerin ötektik reaksiyon oluşturacak Zn'de katı çözünürlüğe sahip olması ve toksik özelliklere sahip olmaması tercih edilmelidir. Bu elementler Mg, Mn ve Li'dir [13].

Bu çalışmada alaşım elementi olarak magnezyum ağırlıkça %1 olarak belirlenmiş ve farklı üretim teknikleri ile Zn-Mg alaşımları üretilmiştir. Mostaed vd. [14], farklı ağırlıkça oranlara sahip Mg içerikleri (%0,15, %0,5, %1, %5) ile bir dizi Zn-Mg alaşımı üretmiştir. Dökme Zn-Mg alaşımlarının mikroyapısının, Zn dendritik taneler ve katmanlı $Zn+Mg_2Zn_{11}$ ötektik yapıdan oluştuğunu göstermişlerdir. Vojtěch vd. [15] ağırlıkça %3'e kadar Mg içeren Zn-Mg alaşımlarını incelemişlerdir. İncelenen tüm alaşımlar arasında, Zn-1Mg'nin en yüksek nihai gerilme mukavemeti (UTS: 190 MPa) ve uzama (%1,7) sergilediği görülmüştür. Galib ve Sharif [16], saf çinkoya ağırlıkça %1'den fazla Mg ilavesinin hipoötektik yapı oluşturduğu ve bu durumun Zn-Mg alaşımlarını kırılğan yaptığı, dolayısıyla sünekliği azalttığı için implant uygulamalarında yeterli gereksinimleri karşılamadığını belirtmişlerdir. Ayrıca Mg'nin Zn'ye %1'den fazla ilavesinin, oluşan Mg_2Zn_{11} fazının Zn'den daha hızlı korozyona uğraması nedeniyle yüzeyde bozulmaya neden olduğu bildirilmiştir [17]. Buna karşı, saf Zn'ye ağırlıkça %1'den daha az Mg ilavesi, tane sınırlarında ötektik yapıların ($Mg_2Zn_{11}+Zn$) oluşmasına yardımcı olarak tane büyümesini engellediği, böylece mekanik özellikleri arttırdığı bilinmektedir [18]. Bu nedenle birçok çalışma düşük Mg içeriklerine yönelik gerçekleştirilmiştir [19-22].

Çinko alaşımlarının mekanik özellikleri döküm koşullarına, alaşım elementine ve miktarına doğrudan bağlıdır [23]. İyi bilindiği üzere her döküm tekniğinde alaşımın sahip olacağı mikroyapı katılaşma/soğutma hızları ile değişkenlik gösterir. Bu çalışmada farklı katılaşma şartlarını oluşturmak için üç farklı döküm tekniği kullanılmıştır: i) gravite döküm ii) katılaşma anında manyetik alan uygulanan gravite döküm iii) yüksek basınçlı döküm. Çinko, yaygın olarak kullanılan tüm alaşımlar arasında en iyi dökülebilir metal olarak kabul edilse de çinko döküm alaşımları (die casting), alüminyum alaşımlarına kıyasla yeterince araştırılmamıştır [24]. Bu nedenle farklı döküm teknikleri uygulanarak Zn esaslı alaşımların özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir.

Konveksiyon gibi katılaşma anında uygulanan işlemler bir malzemenin mikro ve makroyapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir manyetik alanın konveksiyon üzerinde önemli bir etki oluşturması, katılaşma anında manyetik alan uygulanmasını oldukça ilgi çeken bir araştırma haline getirmiştir [25-28]. Zn-Mg alaşımının farklı döküm teknikleri ile üretildiği çalışmalar olmasına rağmen, farklı üretim koşullarının özellikle katılaşma anında uygulanan manyetik alanın mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerini nasıl etkilediğine dair sonuçlardan bahsedilmemiştir. Bu nedenle bu çalışma da HPDC tekniğinin, gravite dökümün ve ayrıca manyetik alan altında gravite dökümün; alaşımın mikroyapı evrimini nasıl etkilediği detaylıca incelenmiş ve mekanik ve korozyon özelliklerine etkisi yapılan testler ile ortaya

konmuştur. Zn'ye Mg ilavesi ile ortaya çıkan ötektik yapının farklı üretim teknikleri ile nasıl değiştiği detaylıca çalışılmıştır.

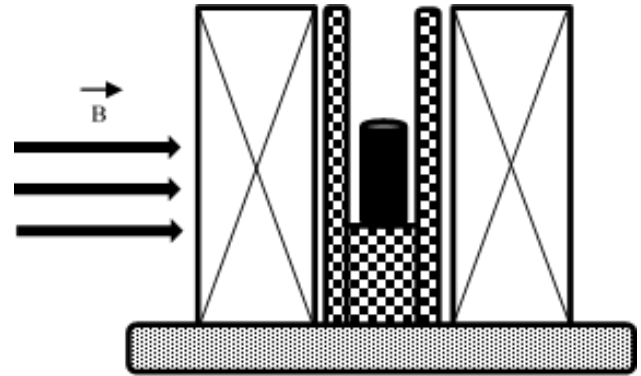
2 Materyal ve metot

2.1 Malzemelerin üretilmesi

Numunelerin üretiminde gravite döküm, manyetik alan altında gravite döküm ve basınçlı döküm olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır (Bk. Tablo 1). Ergitme işlemi 15kW kapasiteli indüksiyon ergitme fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SiC pota içerisinde önce saf çinko 550 °C sıcaklıkta ergitilmiş ve içerisine ağırlıkça %1 Mg olacak şekilde saf magnezyum ilave edilmiştir. Ergitme işlemi esnasında koruyucu atmosfer olarak argon gazı kullanılmıştır. Ergitme işlemi sonrasında eriyik karışım grafit kalıp içerisine dökülerek katılaştırılmıştır. Manyetik alan altında katılaşma işlemi ise eriyik hazırlandıktan sonra katılaştırma işlemi Şekil 1'de görülen manyetik dipol cihazında 2 Tesla'lık manyetik alan uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak aynı alaşım kompozisyonu tekrar hazırlanmış ve 100 ton kapama kuvvetine sahip soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm cihazı kullanılarak Zn-Mg alaşımları üretilmiştir. Üretim esnasında kalıp sıcaklığı 120 °C olarak ayarlanmıştır.

Tablo 1. Farklı döküm teknikleri ile üretilen Zn-Mg alaşımları

Numune Kodu	Döküm Tekniği
ZM-G	Gravite (Yerçekimi) döküm
ZM-M	Manyetik alan altında Gravite (Yerçekimi) döküm
ZM-H	Yüksek basınçlı döküm



Şekil 1. Manyetik alan altında katılaşma işleminin gösterimi

2.2 Mikroyapı karakterizasyonu

Mikroyapı analizleri için Thermo Fisher Scientific Apreo S marka/model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. X ışını kırınım (XRD) analizleri, Cu-K α radyasyonu 40kV'da uygulanmış ve 30mA, 1 derece/dk'lık bir adımla 0 ile 95 derece arasında alınmıştır. Faz tanımlaması ICDD veri tabanına göre yapılmıştır. Her bir üretim tekniğinde tüm numuneler aynı metalografik işlemlerden geçmiştir. Numuneler önce 800, 1200, 2500 ve 4000 gritlik SiC kağıtları ile zımparalanmış, daha sonra 1 μ m elmas pasta ile parlatılmıştır.

2.3 Mekanik karakterizasyon

Numunelerin sertlik hesaplanmasında mikrosertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Alaşımların mekanik özelliklerini belirlemek için Vickers mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Vickers sertlik testleri 1000 gf yük altında 10 s bekleme süresinde, numune yüzeyinden 5 farklı noktalarda alınarak ölçülmüştür.

2.4 Korozyon testleri

Elektrokimyasal ölçümler Tablo 2’de içeriği verilen Hank dengeli tuz solüsyonu (HBSS) içerisinde CHI602 elektrokimya test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal ölçümler klasik üç elektrotlu hücre sistemi ile alınmıştır. Referans elektrot olarak Ag/AgCl, karşı elektrot olarak platin plaka ve çalışma elektrotu olarak 1 cm²’lik bir maruz kalma alanına sahip epoksi reçine ile kapatılmış deneysel numuneler kullanılmıştır. Anodik polarizasyon eğrileri, açık devre potansiyelinden (OCP) başlamış ve 0,5 mV.s⁻¹ tarama hızı ile 1saat boyunca ölçülmüştür. Potansiyodinamik polarizasyon testleri, numuneler HBSS içine daldırıldıktan sonra 0,5mV/s’lik bir tarama hızı ile gerçekleştirilmiş ve tarama potansiyeli -1,3V ile -0,7V aralığında alınmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon testlerinden elde edilen veriler Tafel ekstrapolasyon metodu ile fitlenerek, korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı hesaplanmıştır.

Tablo 2. Hank dengeli tuz solüsyonu içeriği (HBSS)

Kimyasal bileşenler	Konsantrasyon
NaCl	8.00 g/L
C ₆ H ₁₂ O ₆	1.00 g/L
KCl	0.40 g/L
NaHCO ₃	0.35 g/L
CaCl ₂	0.14 g/L
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.10 g/L
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.06 g/L
KH ₂ PO ₄	0.06 g/L
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	0.06 g/L

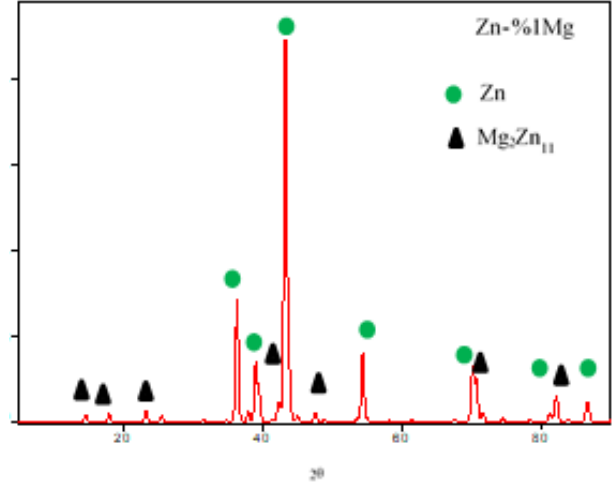
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mikroyapı karakterizasyonu

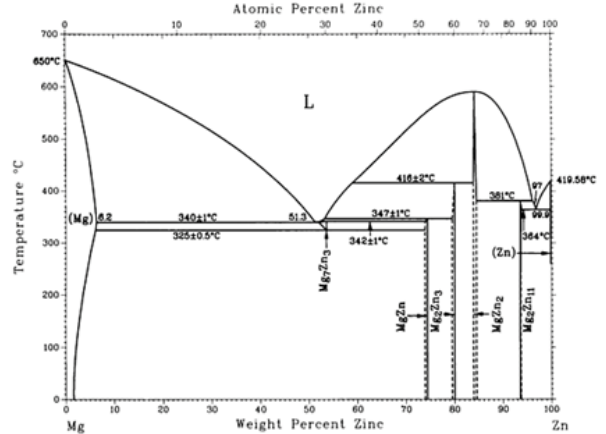
Şekil 2’de gravite döküm Zn-%1Mg alaışımının XRD grafiği görülmektedir. Şekil 3 ile verilen Zn-Mg faz diyagramına göre, Zn’deki Mg’nin maksimum çözünürlüğü 364 °C’de ağırlıkça yaklaşık %0,1’dir. Zn’ye ağırlıkça %3’e kadar Mg ilave edildiği zaman (ötektik bileşimin altında) Zn dendrit taneleri ile Mg₂Zn₁₁ intermetalliği oluşmaktadır [29]. Bu çalışmada üretilen Zn-%1Mg alaışımının XRD grafiği analiz edildiğinde alaışımın Zn fazı ile Mg₂Zn₁₁ intermetaliklerinden oluştuğunu göstermektedir. Şekil 2 ile verilen Zn – Mg faz diyagramına göre, %1 Mg ilavesi ile Zn-Mg eriyiğinin 410 °C’ye soğutulmasıyla önce Zn fazının çöktüğünü daha sonra soğumanın devam etmesiyle 364 °C’de Mg₂Zn₁₁ fazının oluştuğu bilinmektedir [30].

Şekil 4’te farklı üretim teknikleri ile üretilen Zn-%1Mg alaşımlarına ait farklı büyütme SEM görüntüleri sırasıyla ZM-G(a-b), ZM-M (c-d) ve ZM-H (e-f) verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi Mg’nin Zn içerisindeki çözünürlüğü çok düşüktür (yaklaşık %0,1’dir). Bu nedenle genel olarak düşük Mg ilavelerinde Zn fazı ile Mg₂Zn₁₁

intermetaliklerinden oluştuğu bilinmektedir [18]. SEM görüntüleri analiz edildiğinde XRD analizi ile de ortaya konulduğu üzere her üç üretim yöntemi ile üretilen Zn-%1Mg alaşımlarının, Zn taneleri (açık gri bölgeler) ve Zn+Mg₂Zn₁₁ ötektik (koyu gri bölgeler) yapıdan oluştuğu görülmektedir.



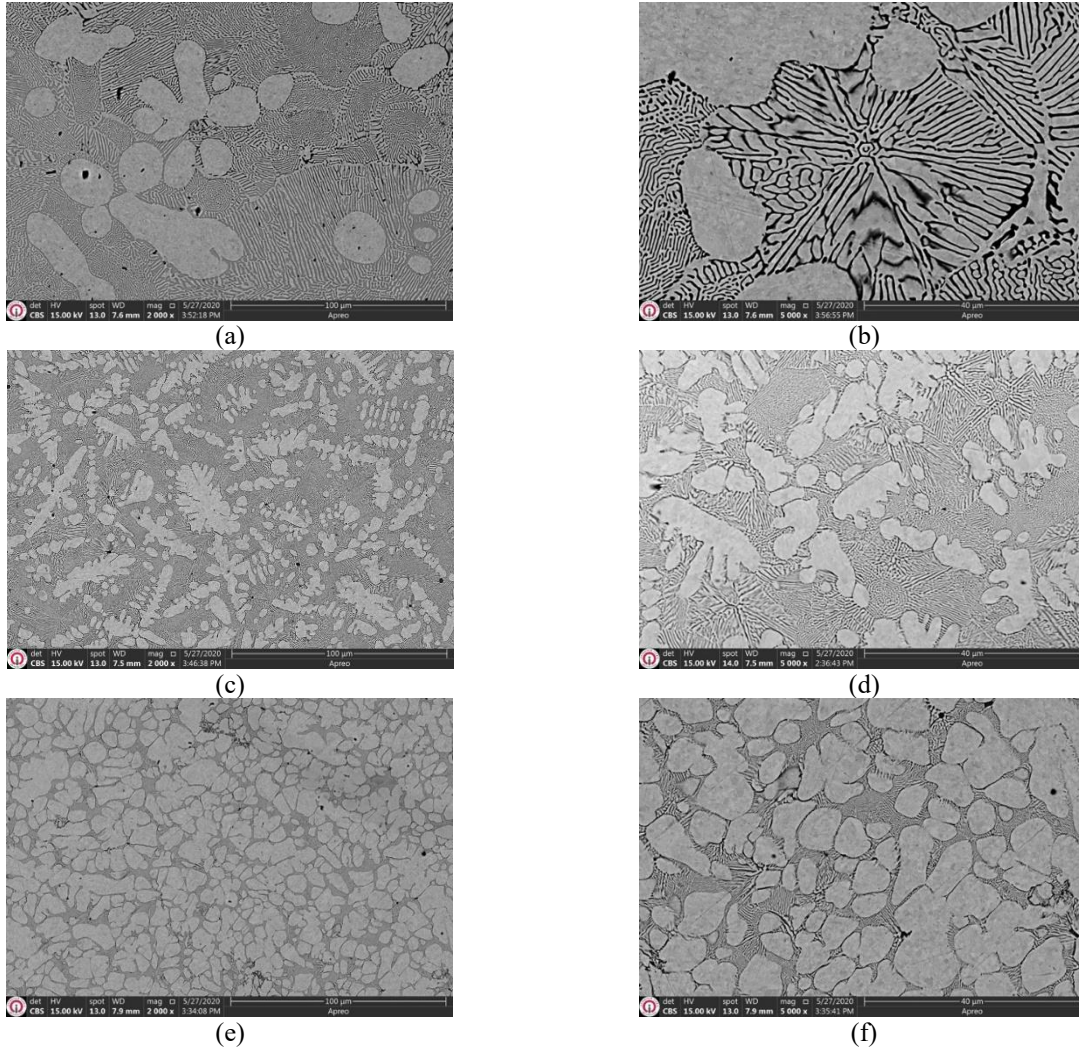
Şekil 2. Zn-%1Mg alaışımının XRD grafiği



Şekil 3. Zn-Mg ikili alaışımının faz diyagramı

Şekil 4 (a, b)’de ZM-G numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Mg ilavesi ile oluşan ötektikler, Şekil 4(a)’de gösterildiği gibi esas olarak Zn dendritleri etrafında oluşmuştur. Ötektik bölgenin detaylı SEM görüntüsü, Şekil 4(b)’de gösterilmektedir. Şekil 4(b)’deki katmanlı koyu alanlar Zn–Mg intermetalikleridir. Şekil 2’de gösterilen Zn–Mg faz diyagramına göre, ağırlıkça %1 Mg içeren Zn–Mg sıvısı yaklaşık 410 °C’ye soğuduğunda, önce sıvıdan Zn fazı çöker. Daha sonra Mg₂Zn₁₁ intermetalik bileşik 364 °C’de oluşur. Böylece Zn tane sınırları boyunca Zn ve Mg₂Zn₁₁ içeren ötektikler elde edilir [30,31]. Ötektik bölgenin hem kısa hem uzun lamellar yapıdan hem de spiral yapıdan oluştuğu görülmektedir.

Şekil 4 (c-d) katılma esnasında manyetik alan uygulanan gravite döküm ZM-M alaışımına ait SEM görüntülerini vermektedir.



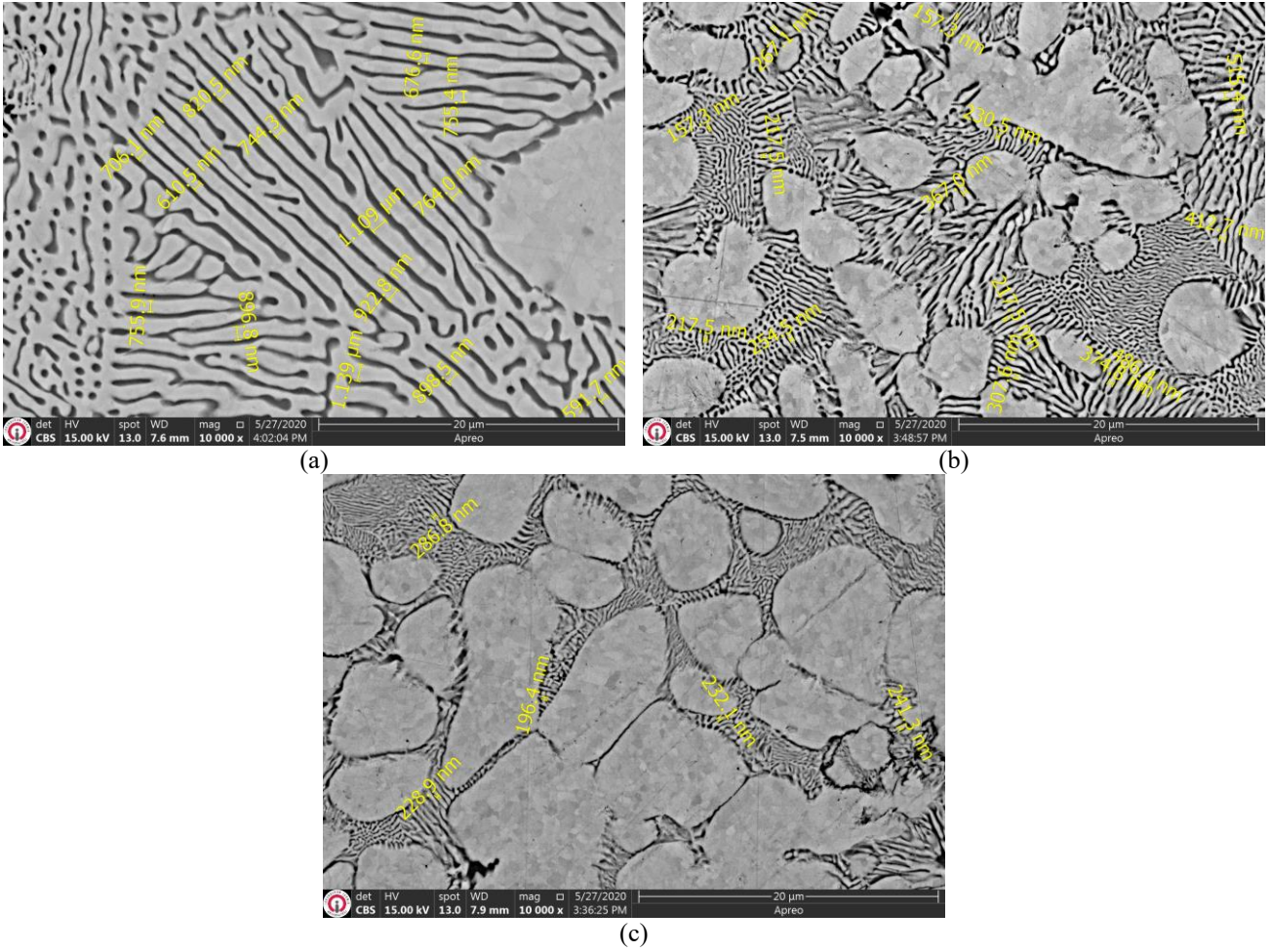
Şekil 4. Farklı üretim teknikleri ile üretilen ZM-G(a-b), ZM-M (c-d) ve ZM-H (e-f) alaşımlarına ait SEM görüntüleri

Sabit bir manyetik alanın uygulanması, katılaşma sırasında alaşımların mikroyapısını kontrol etmenin etkili yöntemlerinden biridir [32,33]. Katılaşma esnasında manyetik alan uygulanması Zn kristallerinin büyümesini engelleyerek yuvarlak Zn matrisinin dendritik yapıya dönüştürdüğü ve taneleri önemli ölçüde incelttiği söylenebilir. Vida vd. [34] tarafından yapılan çalışma da benzer morfolojik yapıları rastlanmıştır. Katılaşma anında manyetik alan uygulanmasının oluşturduğu bu etki Dong vd. [35] tarafından dendrit ucu ve dendritler arası alanların önündeki çözünen dağılımı üzerindeki etkisiyle açıklanmıştır. Zn-Mg alaşımı içerik olarak hem ağır hem de hafif elementlerin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Gravite dökümde büyüme her zaman yerçekiminin tersi yönünde oluşmaktadır. Katılaşma anında hafif elementler yüzdürme ile yukarı çıkar ve sıvı fazda karışır, ağır elementler ise yerçekimi nedeniyle aşağı doğru hareket eder ve interdendrit alanlarda birikir. Böylelikle hem elektromanyetik sönlüme hem de termo-elektromanyetik konveksiyon mikroyapıdaki değişikliğe sebep olur [35-37].

Yüksek basınçlı dökümde yüksek soğuma hızı nedeniyle taneler genellikle küresel morfolojidedir. Yüksek soğutma

hızı yüksek çekirdeklenme hızına neden olmaktadır [38]. Kristaller komşu kristallerle çarpışmadan önce büyümek ve daha dendritik bir morfoloji oluşturmak için çok az alana sahiptir. Bu çalışmada da benzer sonuç elde edilmiş ve hızlı soğuma ile katılaşmanın gerçekleştiği basınçlı döküm yönteminde dendritik yapının küresel yapıya dönüştüğü ve ötektik karışımın diğer iki döküme göre daha ince oluştuğu gözlenmiştir.

Şekil 5'te her üç döküm ile elde edilmiş Zn-%1Mg alaşımlarının mikroyapısında var olan ötektik bölgedeki lameller arası mesafelere ait ölçümler görülmektedir. Şekil 5'teki tablodan anlaşıldığı gibi manyetik alan altında gerçekleştirilen üretimde lameller arası mesafe gravite döküm ile karşılaştırıldığında çok azaldığı, basınçlı döküm ile elde edilen mikroyapıda ise benzer sonuç elde edildiği görülmektedir. Sırasıyla ZM-G, ZM-M, ZM-H numunelerine ait ötektik bölgedeki ortalama lamellar arası mesafe 813,33 nm, 298,4 nm, 213 nm olarak ölçülmüştür. Lamellar arası mesafenin manyetik alan uygulanması ile azaldığı, yüksek basınçlı dökümde ise daha ince ötektik yapının oluştuğu fakat Zn tanelerinin manyetik alana göre arttığı görülmektedir.



Şekil 5. ZM-G (a), ZM-M (b), ZM-H (c) numunelerine ait SEM görüntüleri üzerinden alınan ölçümler

Her üç döküm yöntemi sonrasında elde edilen ZM-G, ZM-M, ZM-H numunelerine ait mikroyapı analizleri birbiri ile karşılaştırıldığında şu sonuçlar elde edilmiştir: i) Gravite dökümde Zn-Mg numunelerinin mikroyapısı iri Zn tanelerine ve ötektik bölge uzun ve mesafeli lamellar yapıya sahiptir. ii) Manyetik alan altında yapılan gravite dökümde ise küresel morfolojideki Zn taneleri dendritik görünümde daha küçük Zn tanelerine dönüşürken ötektik yapı incelmış ve lamellar arası mesafe kısalmıştır. iii) Yüksek basınçlı dökümde ise Zn taneleri homojen ve küresel forma dönüşmüş, ötektik yapı diğer numunelere göre incelmıştır.

3.2 Mekanik karakterizasyon

Tablo 3'te ZM-G, ZM-M ve ZM-H alaşımlarının 1000 gf yük uygulanmasıyla elde edilen 5 farklı ölçüm sonucunun ortalama Vickers mikrosertlik değerleri verilmiştir. Tablo 3'ten görüldüğü gibi en yüksek sertlik değeri yüksek basınçlı döküm yöntemi ile elde edilen ZM-H numunesi için $115,8 \pm 8,3$ HV olarak ölçülmüştür. Manyetik alan altında gravite döküm ile elde edilen ZM-M numunesi için bu değer $112,7 \pm 6,4$ HV ve en düşük Vickers mikrosertlik değeri gravite döküm ZM-G numunesi için $102,3 \pm 6,1$ HV olarak elde edilmiştir. Sonuçlar Liu vd. [39] tarafından elde edilen veriler (döküm Zn-0,8Mg: 71,1 HV) ile kıyaslandığında

alaşımların sertlik değerlerinin kayda değer bir oranda arttığı görülmüştür.

Çinko esaslı alaşımların mekanik özelliklerini dendrit morfolojisi, birincil ve ikincil dendrit kol aralıkları ve lameller arası mesafe önemli derecede etkilemektedir [34, 40-42]. Yüksek basınçlı döküm tekniği Zn-Mg alaşımının dendrit morfolojisini küreselle çevirmiş ve ötektik bölgenin daha ince hale gelmesini sağlamıştır. Sertlikteki artışın ana nedeni lameller arası mesafenin azalmış olması ve dendrit yapısının küçülmesi olarak ile ilişkilidir.

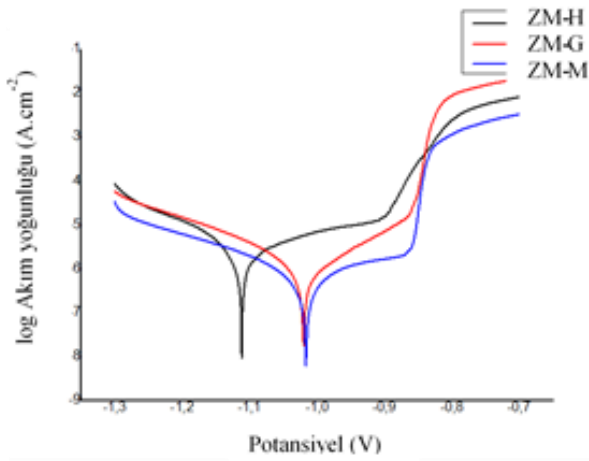
Tablo 3. ZM-G, ZM-M ve ZM-H numunelerine ait ortalama Vickers sertlik değerleri

Alaşım Kodu	Vickers sertlik değeri (HV)
ZM-G	$102,3 \pm 6,1$
ZM-M	$112,7 \pm 6,4$
ZM-H	$115,8 \pm 8,3$

3.3 Korozyon testleri

Farklı üretim teknikleri elde edilen ZM-G, ZM-M, ZM-H numunelerine ait korozyon potansiyeli (E_{kor}), akım yoğunluğu (i_{kor}) ve korozyon hızı (CR) değerleri; polarizasyon eğrilerinin hem katodik hem de anodik dalları kullanılarak Tafel ekstrapolasyon tekniği ile belirlenmiştir.

Şekil 6’de HBSS içerisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal ölçümlerden elde edilen Tafel ekstrapolasyon eğrileri verilmiştir. Tablo 4’te ise bu eğrilerden hesaplanan bazı korozyon parametreleri verilmiştir. Hem Şekil 6 hem de Tablo 4 incelediğinde en iyi korozyon hızına sahip alaşımın manyetik alan altında katılaştırma işlemi ile elde edilen ZM-M (CR=0,60 mm/yr) alaşımı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda ZM-M numunesinin korozyon potansiyel değeri ($E_{kor}=-1,017$); ZM-G ($E_{kor}=-1,112$) ve ZM-H ($E_{kor}=-1,020$) numunelerine göre daha soy hale gelmiş, akım yoğunluğu değeri de azalmıştır. E_{kor} , genel korozyon açısından elektrokimyasal aktiviteye işaret eder ve i_{kor} , korozyon hızını belirtir. Bir malzemenin korozyona karşı direnci, korozyon potansiyeli daha az negatif olmaya başladığında, yani daha soylu hale geldiğinde ve akım yoğunluğunun azalmasıyla artar [34].



Şekil 6. ZM-G, ZM-M, ZM-H numunelerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Tablo 4. ZM-G, ZM-M, ZM-H numunelerine ait bazı korozyon parametreleri

Alaşım adı	E_{kor} (V)	i_{kor} ($\mu A.cm^{-2}$)	Korozyon hızı (mm/yr)
ZM-H	-1.112	5.82	2.40
ZM-G	-1.020	1.3	0.76
ZM-M	-1.017	1.0	0.60

Zn-Mg alaşımlarında korozif etki tam olarak intermetaliklerde başlamaktadır [43]. Fakat halen Zn-Mg intermetaliklerinin korozyon davranışı üzerindeki etkileri anlaşılmamıştır [44,45]. Zn-Mg alaşımlarının korozyon hızının Mg içeriği, çökeltme fazları ve tane boyutları ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir [46]. Zn-Mg alaşımlarındaki ana korozyon mekanizması Zn matrisi ve Zn matrisinden daha yüksek potansiyele sahip Mg_2Zn_{11} intermetalikleri arasındaki galvanik korozyon çiftinin oluşması ve Zn-Mg metal yüzeyinde oluşan korozyon ürünlerin oluşturduğu pasivasyon etkisi ile açıklanabilmektedir. Zn’den ($E^{\circ}_{Zn} = -0,76$ V) daha düşük standart elektrot potansiyeline (E°) sahip bir alaşım elementi korozyona uğrar, bu da alaşımın yüzeyinde koruyucu bir pasif film oluşumuna yol açar ve bunun sonucunda, gelişmiş

bir korozyon direnci sergilenir. Li ($E^{\circ}Li = -3,04$ V), Mg ($E^{\circ}Mg = -2,37$ V) ve Mn ($E^{\circ}Mn = -1,19$ V) böyle bir etkiye sahiptir [13].

Bu çalışma farklı üretim teknikleri ile her bir deneysel numunenin mikroyapısında gözle görülür bir değişim gözlenmiştir. Mikroyapıdaki bu değişim mekanik özelliklerini olduğu kadar korozyon özellikleri üzerinde de etkiye sahip olmuştur. Mikroyapı kısmı incelendiğinde farklı üretim teknikleri ile Zn matrisinin dendrit boyutu ve ötektik bölgedeki yapının tamamen değiştiği gözlemlenmiştir. En düşük korozyon hızı ZM-M ile elde edilirken en yüksek korozyon hızı ZM-H numunesinde elde edilmiştir. Bu iki numunenin mikroyapısı karşılaştırıldığında ZM-M numunesinin daha ince dendritik yapıya ve ötektik bölgeye sahip olduğu görülmektedir. Dendritlerin boyutunun korozyon hızı üzerindeki etkisi halen tartışma konusudur. Fakat Mg, Zn gibi yüksek korozyon hızına sahip alaşımlarda tane boyutu ile korozyon hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Ye vd. [47] yaptıkları bir çalışmada farklı Mg içerikleri ile elde ettikleri Zn-Mg alaşımlarının korozyon hızının, dendritlerin boyutu ve ötektik yapı ile ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Tane inceltme daha yüksek enerji ve kimyasal aktiviteye sahip olan tane sınırlarının miktarını artırarak korozyon oranının arttığı bilinmektedir [48]. Aynı zamanda daha ince tane boyutu koruyucu korozyon ürünlerinin oluşumuna imkân verir [49].

4 Sonuçlar

Bu çalışmada gravite döküm, manyetik alan altında gravite döküm ve yüksek basınçlı döküm teknikleri kullanılarak Zn-%1Mg alaşımları elde edilmiştir. Elde edilen alaşımların mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Her üç üretim tekniğinde de alaşımların mikroyapısı Zn dendritik matrisi ve Mg_2Zn_{11} intermetaliklerinden oluşmuştur. Her üretim tekniğinin, alaşımların hem dendritik yapısı hem de ötektik bölge üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Alaşımların mekanik ve korozyon özelliklerinde mikroyapıdaki bu etkinin bir sonucu olarak gözle görülür bir fark oluşmuştur. Daha ince tane boyutuna ve dendritik yapıya, ayrıca ince ötektik bölgeye sahip olan manyetik altında gravite döküm ile elde edilen Zn-Mg alaşımının optimum mekanik ve korozyon özellik sergilediği ve biyobozunur metalik malzeme olarak uygunluğa sahip olduğu görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışmada incelenen numunelerin üretimi Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretilmesi konusunda yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Hüseyin Şevik’e teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] N. Tipan, A. Pandey and P. Mishra, Magnesium based alloys for biodegradable implants applications using additive manufacturing technique: a review. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 22 (06), 2250042, 2022. <https://doi.org/10.1142/S0219519422500427>
- [2] F. Abdiyan, A. Khanlarkhani, V. Zahedi Asl, P. Biabani, J. Zhao, S. Najafi and Y. Palizdar, Effect of adding Y and Ce on corrosion behaviour of the extruded ZK60 magnesium alloy. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 57 (1), 1-6, 2022. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2021.1976085>
- [3] M.M. Zerankeshi, and R. Alizadeh, Ag-incorporated biodegradable Mg alloys. *Materialia*, 23, 101445, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101445>
- [4] Y. Shi, Z. Xue, P. Li, S. Yang, D. Zhang, S. Zhou, Z. Guan, Y. Li and L.N. Wang, Surface modification on biodegradable zinc alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.149>
- [5] H. Hermawan, D. Dubé and D. Mantovani, Developments in metallic biodegradable stents. *Acta biomaterialia*, 6(5), 1693-1697, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.10.006>
- [6] D. Pierson, J. Edick, A. Tauscher, E. Pokorney, P. Bowen, J. Gelbaugh, J. Stinson, H. Getty, C.H. Lee, J. Drelich and J. Goldman, A simplified in vivo approach for evaluating the bioabsorbable behavior of candidate stent materials. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100 (1): 58-67, 2012. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31922>
- [7] P.K. Bowen, J. Drelich, R.E. Buxbaum, R.M. Rajachar and J. Goldman, New approaches in evaluating metallic candidates for bioabsorbable stents. *Emerging Materials Research*, 1(5), 237-255, 2012. <https://doi.org/10.1680/emr.12.00017>
- [8] J. Duan, L. Li, C. Liu, Y. Suo, X. Wang and Y. Yang, Novel Zn-2Cu-0.2 Mn-xLi (x= 0, 0.1 and 0.38) alloys developed for potential biodegradable implant applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 916, 165478, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165478>
- [9] H. Yang, B. Jia, Z. Zhang, X. Qu, G. Li, W. Lin, D. Zhu, K. Dai and Y. Zheng, Alloying design of biodegradable zinc as promising bone implants for load-bearing applications. *Nature communications*, 11(1), 401, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14153-7>
- [10] D. Vojtěch, J. Kubásek, J. Šerák and P. Novák, Mechanical and corrosion properties of newly developed biodegradable Zn-based alloys for bone fixation. *Acta biomaterialia*, 7(9), 3515-3522, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.05.008>
- [11] H. Kabir, K. Munir, C. Wen and Y. Li, Recent research and progress of biodegradable zinc alloys and composites for biomedical applications: Biomechanical and biocorrosion perspectives. *Bioactive materials*, 6(3), 836-879, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.09.013>
- [12] J. Venezuela and M.S. Dargusch, The influence of alloying and fabrication techniques on the mechanical properties, biodegradability and biocompatibility of zinc: a comprehensive review. *Acta biomaterialia*, 87, 1-40, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.01.035>
- [13] Z.Z. Shi, X.X. Gao, H.J. Zhang, X.F. Liu, H.Y. Li, C. Zhou, Y.X. Yin and L.N. Wang, Design biodegradable Zn alloys: Second phases and their significant influences on alloy properties. *Bioactive materials*, 5(2), 210-218, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.02.010>
- [14] E. Mostaed, M. Sikora-Jasinska, A. Mostaed, S. Loffredo, A.G. Demir, B. Previtali, D. Mantovani, R. Beanland and M. Vedani, Novel Zn-based alloys for biodegradable stent applications: Design, development and in vitro degradation. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 60, 581-602, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.03.018>
- [15] D. Vojtěch, J. Kubásek, J. Šerák and P. Novák, Mechanical and corrosion properties of newly developed biodegradable Zn-based alloys for bone fixation. *Acta biomaterialia*, 7(9), 3515-3522, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.05.008>
- [16] R.H. Galib and A. Sharif, Development of Zn-Mg alloys as a degradable biomaterial. *Advanced in Alloys and Compounds*, 1, 1-7, 2015. <https://doi.org/doi:10.7726/aac.2016.1001>
- [17] H. Liu, H. Huang, Y. Zhang, Y. Xu, C. Wang, J. Sun, J. Jiang, A. Ma, F. Xue and J. Bai, Evolution of Mg-Zn second phases during ECAP at different processing temperatures and its impact on mechanical properties of Zn-1.6 Mg (wt.%) alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 811, 151987, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151987>
- [18] P. Xue, M. Ma, Y. Li, X. Li, J. Yuan, G. Shi, K. Wang and K. Zhang, Microstructure, mechanical properties, and in vitro corrosion behavior of biodegradable Zn-1Fe-xMg alloy. *Materials*, 13(21), 4835, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13214835>
- [19] L.Q. Wang, Y.P. Ren, S.N. Sun, H. Zhao, S. Li and G.W. Qin, Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of as-extruded Zn-Mg binary alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 30, 931-940, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0585-4>
- [20] H. Jin, S. Zhao, R. Guillory, P.K. Bowen, Z. Yin, A. Griebel, J. Schaffer, E.J. Earley, J. Goldman and J.W. Drelich, Novel high-strength, low-alloys Zn-Mg (< 0.1 wt% Mg) and their arterial biodegradation. *Materials Science and Engineering: C*, 84, 67-79, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.11.021>
- [21] L. Wang, Y. He, H. Zhao, H. Xie, S. Li, S., Y. Ren and G. Qin, Effect of cumulative strain on the microstructural and mechanical properties of Zn-0.02 wt% Mg alloy wires during room-temperature drawing process. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 949-

- 957, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.059>
- [22] S. Lin, Q. Wang, X. Yan, X. Ran, L. Wang, J.G. Zhou, T. Hu and G. Wang, Mechanical properties, degradation behaviors and biocompatibility evaluation of a biodegradable Zn-Mg-Cu alloy for cardiovascular implants. *Materials Letters*, 234, 294-297, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.092>
- [23] A. Pola, M. Tocci and F.E. Goodwin, Review of microstructures and properties of zinc alloys. *Metals*, 10(2), 253, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10020253>
- [24] Page, M.A.M and S., Hartmann, Experimental characterization, material modeling, identification and finite element simulation of the thermo-mechanical behavior of a zinc die-casting alloy. *International Journal of Plasticity*, 101, 74-105, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.10.010>
- [25] H. Li, Y. Fautrelle, L. Hou, D. Du, Y. Zhang, Z. Ren, X. Lu, R. Moreau and X. Li, Effect of a weak transverse magnetic field on the morphology and orientation of directionally solidified Al-Ni alloys. *Journal of Crystal Growth*, 436, 68-75, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.10.039>
- [26] G.R., Li, Wang, F.F., Wang, H.M. and Cheng, J.F., July. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy subjected to high static magnetic field. In *Materials Science Forum*, 898, 345-354, 2017. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.345>
- [27] Q. Wang, T. Liu, K. Wang, P. Gao, Y. Liu and J. He, Progress on high magnetic field-controlled transport phenomena and their effects on solidification microstructure. *ISIJ international*, 54(3), 516-525, 2014. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.516>
- [28] X. Li, A. Gagnoud, J. Wang, X. Li, Y. Fautrelle, Z. Ren, X. Lu, G. Reinhart and H. Nguyen-Thi, Effect of a high magnetic field on the microstructures in directionally solidified Zn-Cu peritectic alloys. *Acta materialia*, 73, 83-96, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.03.057>
- [29] ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams v.3, pp. 1114, 1999.
- [30] C. Yao, Z. Wang, S.L. Tay, T. Zhu and W. Gao, Effects of Mg on microstructure and corrosion properties of Zn-Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 602, 101-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.025>
- [31] T. Prosek, A. Nazarov, U. Bexell, D. Thierry and J. Serak, Corrosion mechanism of model zinc-magnesium alloys in atmospheric conditions. *Corrosion Science*, 50(8), 2216-2231, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.008>
- [32] Z. Zhao, Y. Chai, S. Zheng, L. Wang and Y. Xiao, Electromagnetic field assisted metallic materials processing: A review. *steel research international*, 88(5), 1600273, 2017. <https://doi.org/10.1002/srin.201600273>
- [33] Z.H.I. Sun, M. Guo, J. Vleugels, O. Van der Biest and B. Blanpain, Strong static magnetic field processing of metallic materials: A review. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 16(5), 254-267, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2012.08.001>
- [34] T.A. Vida, C. Brito, T.S. Lima, J.E. Spinelli, N. Cheung and A. Garcia, Near-eutectic Zn-Mg alloys: Interrelations of solidification thermal parameters, microstructure length scale and tensile/corrosion properties. *Current applied physics*, 19(5), 582-598, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.02.013>
- [35] Y. Dong, S. Shuai, J. Yu, W. Xuan, Z. Zhang, J. Wang and Z. Ren, Effect of high static magnetic field on the microstructure and mechanical properties of directionally solidified alloy 2024. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 978-989, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.259>
- [36] G.M. Oreper and J. Szekely, The effect of an externally imposed magnetic field on buoyancy driven flow in a rectangular cavity. *Journal of Crystal Growth*, 64(3), 505-515, 1983. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(83\)90335-4](https://doi.org/10.1016/0022-0248(83)90335-4)
- [37] J.A. Shercliff, Thermoelectric magnetohydrodynamics. *Journal of fluid mechanics*, 91(2), 231-251, 1979. <https://doi.org/10.1017/S0022112079000136>
- [38] S. Otarawanna, C.M. Gourlay, H.I. Laukli, and A.K. Dahle, Microstructure formation in high pressure die casting. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 62(4), 499-503, 2009. <https://doi.org/10.1007/s12666-009-0081-2>
- [39] S. Liu, D. Kent, N. Doan, M. Dargusch and G. Wang, Effects of deformation twinning on the mechanical properties of biodegradable Zn-Mg alloys. *Bioactive materials*, 4, 8-16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2018.11.001>
- [40] P.R. Goulart, J.E. Spinelli, N. Cheung and A. Garcia, The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 119(1-2), 272-278, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.08.063>
- [41] W.R. Osório, D.R. Leiva, L.C. Peixoto, L.R. Garcia and A. Garcia, Mechanical properties of Sn-Ag lead-free solder alloys based on the dendritic array and Ag3Sn morphology. *Journal of Alloys and Compounds*, 562, 194-204, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.02.050>
- [42] T.A. Costa, M. Dias, E.S. Freitas, L.C. Casteletti and A. Garcia, The effect of microstructure length scale on dry sliding wear behaviour of monotectic Al-Bi-Sn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 689, 767-776, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.051>
- [43] P. Volovitch, C. Allely and K. Ogle, Understanding corrosion via corrosion product characterization: I. Case study of the role of Mg alloying in Zn-Mg coating on steel. *Corrosion science*, 51(6), 1251-1262, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.005>
- [44] R. Krieg, A. Vimalanandan and M. Rohwerder, Corrosion of zinc and Zn-Mg alloys with varying microstructures and magnesium contents. *Journal of*

- The Electrochemical Society, 161(3), C156, 2014.
<https://doi.org/10.1149/2.103403jes>
- [45] T. Prosek, D. Persson, J. Stouilil and D. Thierry, Composition of corrosion products formed on Zn–Mg, Zn–Al and Zn–Al–Mg coatings in model atmospheric conditions. *Corrosion Science*, 86, 231-238, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.05.016>
- [46] H. Gong, K. Wang, R. Strich and J.G. Zhou, In vitro biodegradation behavior, mechanical properties, and cytotoxicity of biodegradable Zn–Mg alloy. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 103(8), 1632-1640, 2015.
<https://doi.org/10.1002/jbm.b.33341>
- [47] L. Ye, H. Huang, C. Sun, X. Zhuo, Q. Dong, H. Liu, J. Ju, F. Xue, J. Bai and J. Jiang, Effect of grain size and volume fraction of eutectic structure on mechanical properties and corrosion behavior of as-cast Zn–Mg binary alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 1673-1685, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.101>
- [48] N. Birbilis, K.D. Ralston, S. Virtanen, H.I. Fraser and C.H.J. Davies, Grain character influences on corrosion of ECAPed pure magnesium. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 45(3), 224-230, 2010.
<https://doi.org/10.1179/147842209X12559428167805>
- [49] S.H. Etefagh Far, A. Rahimi, M. Chaghazardi and A. Davoodi, Microstructure characterization and electrochemical corrosion behavior of Zn and Zn/Mg alloys in H₂SO₄ solution. *Journal of Central South University*, 22, 2007-2013, 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11771-015-2722-4>





Friction stir spot weld (FSSW) of AZ91 magnesium alloys; effect of axial force and rotational speed on weld quality and an approach on inspection planning

AZ91 magnezyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı; eksenel kuvvet ve dönme hızının kaynak kalitesine etkisi ve muayene planlamasına ilişkin bir yaklaşım

Yasin Sarıkavak^{1,*} 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Mechanical Engineering, 06010, Ankara, Türkiye

Abstract

In this study, the friction stir spot welding (FSSW) process for the magnesium alloy (AZ91) sheet materials are investigated. Friction stir spot welding (FSSW) is a solid-state welding process and one of the innovative methods to join specifically automotive components. Recently magnesium alloys are promising materials where combination of high strength and low density can be observed to improve vehicle performance and reduce emissions and fuel consumption in structural materials for automotive applications. A finite element model (FEM) established to understand the effect of axial force and rotational speed during the simulation in automotive applications. The FEM investigates the effect of axial force ranging from 1 kN to 8 kN and rotational speeds of 1000 rpm - 4000 rpm. The model analyses the heat flux and the temperature rise that leads defect formation after the process. 4.5 kN, 6 kN and 8 kN axial forces and 3000 rpm-4000 rpm rotational speeds are evaluated as the critical values in terms of defect and crack formation during the process under specified boundary conditions. Finally, several non-destructive inspection methods are suggested to secure structural integrity after the FSSW process to eliminate the harmful effects of surface and volumetric discontinuities.

Keywords: Friction stir spot weld (FSSW), Finite element analysis (FEM), Magnesium alloy (AZ91), Axial force, Rotational speed, Nondestructive testing

1 Introduction

Friction stir spot welding (FSSW) is a solid-state welding process and one of the innovative methods to join specifically automotive components. The conventional method was invented by Mazda Motor Cooperation in 1993 [1]. The temperatures are below the workpiece melting temperature through the tool-workpiece interface that prevents metallurgical problems via fusion process and frictional heating and plastic deformation occurs during the process. FSSW has not been tested for long term service conditions for automotive components and suffers from

Öz

Bu çalışmada magnezyum alaşımlı (AZ91) sac malzemeler için sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi incelenmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, katı hal kaynak işlemidir ve özellikle otomotiv bileşenlerini birleştirmek için kullanılan yenilikçi kaynak yöntemlerinden biridir. Son yıllarda magnezyum alaşımları, otomotiv uygulamalarına yönelik yapısal malzemelerde araç performansını artırmak ve emisyonları ve yakıt tüketimini azaltmak için yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk kombinasyonunun gözlenebildiği umut verici malzemelerdir. Otomotiv uygulamalarında eksenel kuvvet ve dönme hızının malzeme üzerine etkisini anlamak için bir sonlu elemanlar model geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile 1 kN ile 8 kN arasında değişen eksenel kuvvetin ve 1000 rpm - 4000 rpm arasındaki dönme hızlarının etkisini araştırılmıştır. Model, işlem sonrasında süreksizlik oluşumuna yol açan ısı akışını ve sıcaklık artışını analiz etmektedir. 4,5 kN, 6 kN ve 8 kN eksenel kuvvetler ve 3000 rpm-4000 rpm dönme hızları, belirlenen sınır şartları altında süreksizlik oluşumu açısından kritik işleme parametreleri olarak değerlendirilmiştir. Son olarak, sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminden sonra yüzey ve hacimsel süreksizliklerin zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için ve yapısal bütünlüğü sağlamak amacıyla çeşitli tahribatsız muayene yöntemleri önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, Sonlu elemanlar analizi, Magnezyum alaşımı (AZ91), Eksenel kuvvet, Dönme hızı, Tahribatsız muayene

thermomechanical effected zones which have effects similar effects of heat affected zones (HAZ) as observed in conventional welding methods. For automotive applications solid state methods can be applicable to join vehicle body components, wheel rims, suspension arm struts for aluminium alloys (i.e. Al 2219), magnesium alloys (i.e. AZ91) and other similar and dissimilar materials (i.e. zinc and copper) to replace electric resistance spot welding [2]. The vehicle body structure components requires, on average 4000 to 6000 spot welds where these sections are critical zones for the entire structure [3]. The solid-state welding processes have some advantages towards bolted and riveted

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ysarikavak@aybu.edu.tr (Y. Sarıkavak)
Geliş / Recieved: 30.08.2023 Kabul / Accepted: 11.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1352828

joints where improved strength, decreased costs and rigidity promotes the application of these methods [4]. Recently magnesium alloys are promising materials where combination of high strength and low density can be observed to improve vehicle performance and reduce emissions and fuel consumption in structural materials for automotive applications [5, 6]. To decrease the emissions and meet the requirements of the international environmental norms several alternative automotive applications are suggested such as shifting to hydrogen powered vehicles [7]. Thus, for the lightweight materials that contribute the decrease in emissions solid state welding is applicable for lightweight magnesium alloys. The FSSW and friction stir weld (FSW) are innovative joining processes for automotive components that are difficult to weld by conventional methods [6]. Several studies exist in literature that investigates several aspects of the FSSW in automotive applications.

Su et al. [8] investigated the formation of local melted film during FSSW of AZ91. The temperature around the rotating pin ranges 438 to 454 °C during the process. The tool and pin diameters are 10 mm and 4 mm with rotational speed of 3000 rpm and a plunge rate of 2.5, 5 and 25 mm/s. K-type thermocouples are located 1 mm below the AZ91 material and 2 mm away from the tool pin-shoulder. Gerlich et al. [9] investigated the FSSW of similar and dissimilar aluminium (Al6111 and Al2024) and magnesium alloys (AZ91) under rotation speed of 2500 rev/min and a 4 s dwell period. K-type thermocouples located 0.8 mm from the outer periphery of the tool shoulder. The tool and pin diameters are 10 mm and 4 mm respectively. The investigated experimental peak temperatures are at the base of the pin are 531°C, 495°C, and 462° C for Al6111, Al2024 and AZ91 respectively. Yamamoto et al. [10] analysed the liquid penetration induced cracks during FSSW of AZ91, AZ31 and AM60. The cracking and axial pressures during FSSW of dissimilar AM60/AZ91 were investigated by Yamamoto et al. [11] where liquation cracking is a factor for joining the dissimilar AM60/AZ91 materials and cracking occurs in the thermomechanical affected zone (TMAZ). Zhang et al. [12] investigated the effect of plunge depth on microstructure and fracture in FSSW. Plunge depths of 2.0 and 2.5 mm analysed with 1400 rpm rotational speed and 0.9 m/s plunge speed.

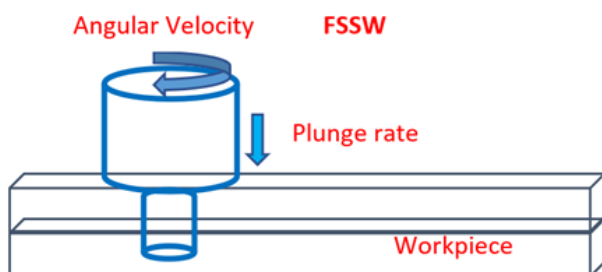


Figure 1. Schematic representation of FSSW process [13]

The finite element models (FEM) to simulate FSSW process conducted by various researchers to simulate three main steps of plunging, stirring, and retraction where

experimental processes are time consuming and requires high cost. The schematic representation of FSSW can be seen in Figure 1 [13]. Constantin et al. [13] developed a FEM to join Al6061-T6 by a fully coupled thermal-stress three dimensional model and the model validated with the experimental data published in the literature. Jedrasiak et al. [14] developed a thermal model for FSSW process. Al-Al and Al-Steel automotive sheet alloys are joined in the developed model. H13 tool steel with 10 mm diameter used and K-type thermocouples installed for the process. The maximum heat input and temperature rise occurs during the dwell section in FSSW. The 2000 rpm rotational speed and 150 and 100 mm/s plunge rates are setted during the process. The convection and radiation heat transfers neglected in the study.

In recent years solid state welding processes frequently applied for many industry fields that includes automotive industry. For the resistance spot welding process automated ultrasonic inspection of weld nugget is applicable for various automotive components [15-17]. FSW and FSSW are the applicable methods for joining dissimilar and difficult to weld materials. The post weld and during the service conditions, it is important to evaluate the non-destructive testing (NDT) methods to secure structural integrity in critical components specifically after welding processes for different purposes of vehicle body components [18]. To detect and characterize discontinuities various applications exist for different targets. Main types of NDT methods are the visual inspection (optical), ultrasound inspection and advanced ultrasonic laser and phased array methods [15, 19]. Various other methods are applicable such as acoustic emission, radiography, thermography, magnetic particle inspection and liquid penetrant testing [3, 4, 20]. Various optical methods are under application and development for structural components and lifeline structures in the field [21].

Therefore, in this study magnesium alloy (AZ91) materials used for the simulation process of FSSW for the sheet metals in automotive applications. Effect of axial force, rotational speed and their effect on temperature distribution is investigated by using finite element analysis method. The analysed axial forces are ranging from 1 kN to 8 kN and 1000 rpm to 4000 rpm rotational speeds simulated to investigate heat flux and temperature rise that leads defect formation after the process. Finally, several non-destructive inspection methods are suggested to secure structural integrity after the FSSW process.

2 Materials and method

The material employed for the validation process is AZ91 sheet with 6.3 mm thick sheet where FSSW tool is made of H13 steel, shoulder and pin diameters are 10 mm and 4 mm respectively. Rotational speed during the process is 3000 rpm with 4s dwell period [8]. The maximum axial pressure during the process is 4.5 kN [9].

2.1 Numerical model

The process basically consists of various stages as initially in the tool-workpiece interface touchdown of the pin occurs and then start of pin penetration to the plunge, end of plunge and contact of shoulder in the dwell period occurs and

process finalize with the retraction of the tool [22]. Plunge, dwell and retraction are the basic three steps during the process.

The volumetric heat flux with gaussian distribution applied during the process [23]. The heat input during the process can be seen in Figure 2 [14].

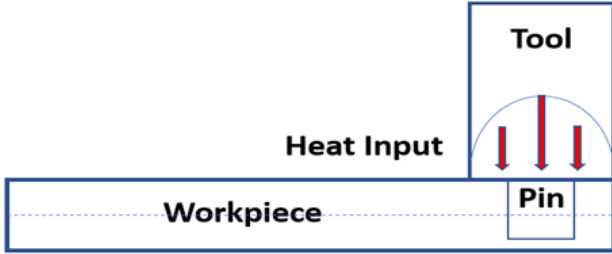


Figure 2. Schematic representation of heat input during FSSW processes via tool/pin [14]

In Equation (1) the heat flux tool/pin and workpiece interface due to friction is [22];

$$q_f = n\tau s \quad (1)$$

Where n is the fraction of frictional work converted to heat, τ is the frictional stress in ‘Pa’, and s is the slip rate ‘m.s-1’ and the frictional stress can be expressed as (Equation (2));

$$\tau = \mu(T) \cdot P(T) \quad (2)$$

Where μ is the friction coefficient, P is the contact pressure in ‘Pa’ and T is the temperature. In Equation (3) the frictional heat dependent to tool dimensions, rotational speed and axial force can be expressed as [24, 25];

$$q_f = 2\pi\mu RN F_n \quad (3)$$

Where R is the tool radius, N is the rotational speed of the tool/pin and F_n is the axial force. Equation (4) shows the heat flux due to conduction [22];

$$q_c = k(h, P, T)(T_1 - T_2) \quad (4)$$

Where h is the overclosure (penetration of master surface) in ‘m’ and the P is the contact pressure [22]. The three-dimensional heat conduction equation in the workpiece is (Equation (5)) [25, 26];

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (5)$$

Where T is the time dependent temperature, c is the specific heat, ρ is the density, k_x , k_y , k_z are the heat conductivities in three perpendicular directions and q is the generated heat during the process.

To simulate workpiece material behaviour for elastic plastic model, strain rate and temperature dependent

Johnson-Cook material model best fits with FSSW process as seen in Equation (6) [13].

$$\bar{\sigma} = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^{pl})^n] \cdot \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0^{pl}} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (6)$$

Where $\bar{\sigma}$ is the flow stress, $\bar{\epsilon}^{pl}$ is the equivalent plastic strain, $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ is the equivalent plastic strain rate, $\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0^{pl}}$ is the normalized equivalent plastic strain rate, A , B , C , n and m are the material constants and the exponent n considers the hardening of the material where m is dependent to melting and T_{ref} is the ambient temperature.

The density of AZ91 is 1.81 g/cm³, thermal conductivity, specific heat and the melting temperature is 84 W/mK, 1 J/g °C and ≥421 °C respectively. The tensile yield strength, and tensile strength is 95 MPa and 125 MPa, respectively. At the top surface of the workpiece convective heat transfer coefficient defined as $h=30$ W/m²·°C. Conduction heat transfer defined for the workpieces and at the bottom of the workpiece with a value of 100000 W/m²·°C [13].

During the FSSW process axial pressure ranges up to 14 kN under 3000 rpm rotational speed [11]. The midway of the dwell period the highest axial pressures can be observed and it gradually decreases with time until the end of the FSSW process. Thus, various axial pressures of the tool-pin material analysed considering the values of 1 kN, 2 kN, 3 kN, 4.5 kN, 8 kN for the simulation process, respectively.

3 Results and discussion

3.1 Validation

The K-type thermocouple was installed 1 mm below the upper surface of the sheet around the pin periphery (0.4 mm apart) with a tool rotational speed of 3000 rpm, 4.5 kN axial force, a plunge rate of 2.5 mm/s with 4 s dwell period [8]. The temperature distribution with the FEM through the thickness can be seen in Figure 3. The obtained FEM result 1 mm below the upper surface around the pin periphery is 453.8 °C as seen in Figure 3.

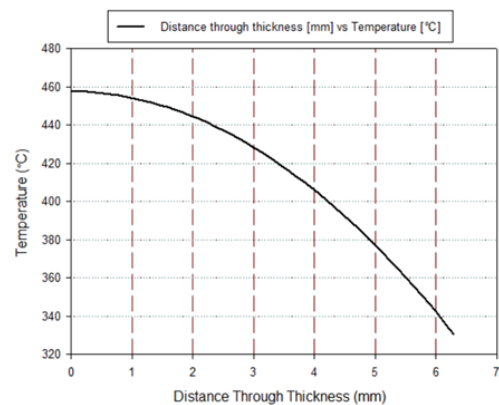


Figure 3. FEM results of temperature distribution through thickness under experimental conditions

The experimental result measured via K-type thermocouple is 453 °C as the maximum value at the same location [8]. This maximum temperature decreases to 438 °C through the dwell period during FSSW with time. As seen here experimental and the FEM results are almost same and the developed model gives consistent results for the FSSW process.

3.2 Effect of axial pressure in FSSW

The developed FEM employed under various boundary conditions. One of the major parameters for an effective weld without defect formation is the applied axial force. It is clearly observed that the peak temperature during the process shows significant change under different axial force during the process (see Figure 4). For the experimental value of 4.5 kN axial force, the analysed maximum temperature under the sheet surface is 457.6 °C and this value decreases through the thickness. This temperature decreases and increases according to the change in axial force as well. The 1 kN axial force resulted with 116.4 °C at the top of the sheet material which this thermal change will not lead softening of the sheet metal sufficiently and will not lead any microstructural change during the process.

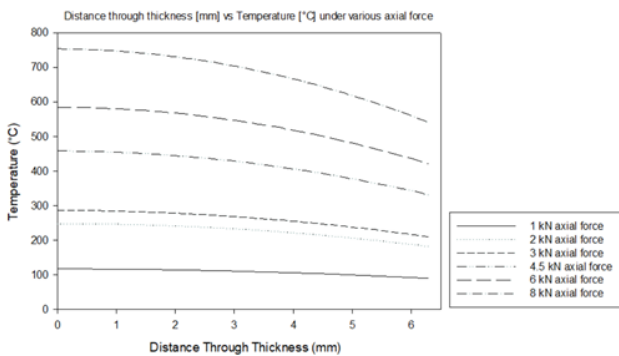


Figure 4. Temperature distribution under various axial force in FSSW

Increase in axial force resulted with increase in the peak temperature where 2 kN, 3 kN, 6 kN and 8 kN axial forces are employed for the simulation process. The obtained peak temperatures are 246.9 °C, 285.6 °C, 584.4 °C, and 753 °C respectively. The melting temperature of AZ91 is ≥ 421 °C and according to these peak temperatures on pin periphery are below the melting temperature for the axial forces of 1 kN, 2 kN, 3 kN values. For the rest of the employed parameters such as 4.5 kN, 6 kN and 8 kN during the dwell period peak temperature reach above the melting temperature. The sufficient temperature to melt the workpiece result with the smooth spot weld process where insufficient temperature to soften the material may lead tool-pin consumption, failure and instable process that may lead discontinuities in the sheet metal.

In general, it is assumed that FSSW generates improved and defect free joints compared to the other welding methods (fusion welding etc.) however various defects are reported during the process according to the liquation cracking in the thermomechanically (TMAZ) affected zones. In literature [27, 28], early in the dwell period eutectic film formation and

cracking observed due to the rapid dissolution of melted eutectic films. The cracking in the grain boundary regions of stir zones are reported for elevated temperatures [28]. The local melting can be observed in TMAZ for the increased axial forces that lead elevated temperatures over melting point and this results with the cracking in the sheet metal.

The operational conditions are also critical where repeated loading to the FSSWed alloy sheets may lead failure under fatigue loading conditions. Several studies reported where crack may initiate and propagate at the tongue like region in the weld area. Luo et al. [29] reported that primary stage of crack propagation exist in the outer section of the weld area and propagates along the interface of heat affected zone (HAZ) and TMAZ across the direction of the force. Thus, internal cracks in the HAZ and TMAZ sections [29] and lack of mixing, incomplete refill, contamination and combination of these defects [30] are possible defect types that can be considered in terms of lifetime monitoring and quality check in terms of non-destructive inspection perspective.

3.3 Effect of rotational speed in FSSW

The other important process parameter for FSSW is the rotational speed of the tool/pin material.

The tool material of H13 steel used for the process and effect of rotational speed for heat flux and temperature rise investigated for the values ranging from 1000 rpm to 4000 rpm. Figure 5 shows the effect of rotational speed on temperature through the thickness of the sheet. The investigated maximum temperature for 1000 rpm rotational speed is 171.6 °C and this gradually decreases through the thickness to 128.1 °C at the bottom of the sheet material. For 2000 rpm at the top and bottom of the sheet 298.2 °C and 217.9 °C investigated, respectively. The 3000 rpm and 4000 rpm rotational speeds results with 457.6 °C and 550.9 °C; 397.3 °C at the top and bottom surface of the sheet. Thus, according to the simulated results 3000 rpm and 4000 rpm boundary conditions results with the temperatures over the melting point of the AZ91.

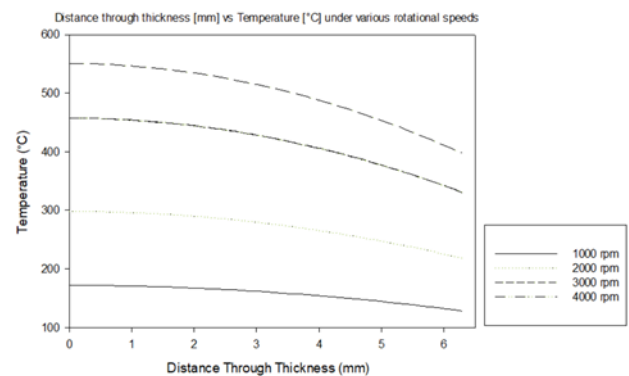


Figure 5. Effect of rotational speed on temperature in FSSW

3.4 Non-Destructive Inspection (NDI) approach for FSSWed joints

Considering the process temperatures and heat flux occurred during the operation in FSSW both internal and

surface cracks (thermal) can be observed. For the volumetric defects acoustic emission and various types of ultrasonic inspection methods are candidate methods for structural integrity in the FSSWed automotive and vehicle components. Real time monitoring during the process, post weld inspection and detection under service conditions for specified time periods are critical based on the application area, process parameters and employed materials. Dahmane et al. [30] employed real time acoustic emission for detection of discontinuities and on the other hand, Zhang et al. [31] used the non-contact laser ultrasonic inspection for discontinuity detection in FSSW process. Non-contact methods are relatively easy to apply and results with feasible applications under field conditions such as in service applications [32]. The contact ultrasonic pulse echo method is relatively less in cost and feasible for inspection after manufacture. Considering the thickness of the sheet alloys inspection frequency in ultrasonic method should be well arranged to obtain accurate results.

The thermal cracks and other surface defects dependent to process parameters are possible surface discontinuities in FSSW. For the defect and discontinuity detection which are located on the surface of the workpiece, initially visual inspection is an important method prior to the other inspection methods. The liquid penetrant and magnetic particle inspection methods are other applicable methods for surface defects after FSSW. Thus, for volumetric and surface defect combinations one of the volumetric methods of ultrasonic or acoustic emission tests can be applicable where for the surface detection visual inspection and magnetic particle or liquid penetrant tests are other possible candidate methods for structural integrity.

4 Conclusions

In this study finite element-based process simulation of FSSW conducted. Various aspects considered during the simulation and effect of axial force and rotational speed in terms of temperature rise evaluated in detail for various levels range between 1 kN to 8 kN and 1000 rpm to 4000 rpm. Temperature rise that leads crack formation during the process evaluated and considering possible discontinuity types several non-destructive inspection methods are suggested for FSSW process under real time monitoring, after manufacturing and under service conditions for automotive applications. Below conclusions can be drawn:

Increase in axial force resulted with increase in the peak temperatures. The various axial force is employed ranging from 1 kN to 8 kN for the simulation process. The obtained peak temperatures are 116.4 °C, 246.9 °C, 285.6 °C, 457.6 °C, 584.4 °C, and 753 °C respectively for 1 kN, 2 kN, 3 kN, 4.5 kN, 6 kN and 8 kN axial forces.

For 3000 rpm rotational speed, temperatures are over melting point for 4.5 kN, 6 kN and 8 kN axial forces, thus these forces are the critical values in terms of defect and crack formation during the process under specified conditions.

The results under 4.5 kN axial force and 3000 rpm to 4000 rpm shows increased temperatures that are over the melting point of AZ91.

The developed model for the simulation of FSSW is validated considering the experimental results reported in the literature thus, other process parameters can be simulated to evaluate peak temperature, the temperature distribution and defect formation for the process.

For the volumetric discontinuities ultrasonic and acoustic inspection and for the surface defects visual, magnetic particle or liquid penetrant test methods are effective methods for structural integrity considering the possible discontinuities dependent to process physical nature.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19%

References

- [1] X. W. Yang, T. Fu and W. Y. Li, Friction stir spot welding: a review on joint macro and microstructure, property, and process modelling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 697170, 1–11, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/697170>.
- [2] M. A. Omar, *The Automotive Body Manufacturing Systems and Processes*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, 2011.
- [3] J. Chen and Z. Feng, IR-based spot weld NDT in automotive applications. *Proceedings, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*; 9485, Baltimore, United States, 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2177124>.
- [4] M. M. Shtrikman, Current state and development of friction stir welding Part 3. Industrial application of friction stir welding. *Welding International*, 22, 806–815, 2008. <https://doi.org/10.1080/09507110802593620>.
- [5] O. Torun and I. Celikyurek, The effect of the friction pressure on the friction welding of AZ91 and Fe₃Al alloys. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 7, 175–180, 2019.
- [6] C. Blawert, N. Hort and K. U. Kainer, Automotive applications of magnesium and its alloys. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 57, 397–408, 2004.
- [7] M. Ciniviz and H. Köse, Hydrogen use in internal combustion engine: a review. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 1, 1–15, 2012.
- [8] P. Su, A. Gerlich, M. Yamamoto and T. H. North, Formation and retention of local melted films in AZ91 friction stir spot welds. *Journal of Materials Science*, 42, 9954–9965, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2061-4>.
- [9] A. Gerlich, P. Su and T. H. North, Peak temperatures and microstructures in aluminium and magnesium alloy friction stir spot welds. *Science Technology of Welding and Joining*, 10, 647–652, 2005. <https://doi.org/10.1179/174329305X48383>.
- [10] M. Yamamoto, A. Gerlich, T. H. North and K. Shinozaki, Liquid penetration induced cracking in Mg-alloy spot welds. *Materials Science Forum*, 580–582,

- 409–412, 2008. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.580-582.409>.
- [11] M. Yamamoto, A. Gerlich, T. H. North and K. Shinozaki, Cracking in dissimilar Mg alloy friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13, 583–592, 2008. <https://doi.org/10.1179/174329308X349520>.
- [12] H. F. Zhang, L. Zhou and W. Li, Effect of tool plunge depth on the microstructure and fracture behavior of refill friction stir spot welded AZ91 magnesium alloy joints. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 699–709, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2044-x>.
- [13] M. A. Constantin, A. Boşneag, M. Iordache, C. Bădulescu and E. Nițu, Numerical simulation of friction stir spot welding. *Applied Mechanics and Materials*, 834, 43–48, 2016. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.834.43>.
- [14] P. Jedrasiak, H. R. Shercliff and A. Reilly, Thermal modeling of Al-Al and Al-Steel friction stir spot welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 9, 4089–4098, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2225-y>.
- [15] C. Ji, J. K. Na, Y. S. Lee, Y. Do Park and M. Kimchi, Robot-assisted non-destructive testing of automotive resistance spot welds. *Welding in the World*, 73, 6, 753–763, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01002-1>.
- [16] P. Buschke, W. Roye and T. Dahmen, Multiple NDT methods in the automotive industry. Huerth, Germany, 2002.
- [17] S. A. Titov, R. G. Maev and A. N. Bogachenkov, Pulse-echo NDT of adhesively bonded joints in automotive assemblies, *Ultrasonics*, 48, 6–7, 537–546, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.07.001>.
- [18] Z. Wu, X. Zhou, N. Ao, X. Han, Z. Zhu and S. Wu, Tensile and fatigue behaviors of hybrid laser welded A7N01 alloy with repairing for railway vehicles. *Engineering Failure Analysis*, 143, 1–15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106930>.
- [19] M. Thornton, L. Han and M. Shergold, Progress in NDT of resistance spot welding of aluminium using ultrasonic C-scan. *NDT&E International*, 48, 30–38, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.02.005>.
- [20] H. Taheri, M. Kilpatrick, M. Norvalls, W. J. Harper, L. W. Koester, T. Bigelow and L. J. Bond, Investigation of nondestructive testing methods for friction stirwelding. *Metals (Basel)*, 9, 6, 1–22, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9060624>.
- [21] Y. K. Zhu, G. Y. Tian, R. S. Lu and H. Zhang, A review of optical NDT technologies. *Sensors*, 11, 8, 7773–7798, 2011. <https://doi.org/10.3390/s110807773>.
- [22] S. U. Khosa, T. Weinberger and N. Enzinger, Thermo-mechanical investigations during friction stir spot welding (FSSW) of AA6082-T6. *Welding in the World*, 54, 134–146, 2010. <https://doi.org/10.1007/BF03263499>.
- [23] P. Jedrasiak and H. R. Shercliff, Small strain finite element modelling of friction stir spot welding of Al and Mg alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 18, 207–222, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.031>.
- [24] M. Awang, V. H. Mucino, Z. Feng and S. A. David, Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (FSSW). *SAE International*, 724, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1392>.
- [25] M. Awang, Simulation of friction stir spot welding (FSSW) process: study of friction phenomena, West Virginia University, USA, 2007.
- [26] Y. Sarikavak, An advanced modelling to improve the prediction of thermal distribution in friction stir welding (FSW) for difficult to weld materials. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43, 4, 1-14 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02735-2>.
- [27] M. Yamamoto, A. Gerlich, T. H. North and K. Shinozaki, Mechanism of cracking in AZ91 friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12, 3, 208–216, 2007. <https://doi.org/10.1179/174329307X177900>.
- [28] M. Yamamoto, A. Gerlich, T. H. North and K. Shinozaki, Cracking in the stir zones of Mg-alloy friction stir spot welds, *Journal of Materials Science*, 42, 18, 7657–7666, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1662-2>.
- [29] T. J. Luo, B. L. Shi, Q. Q. Duan, J. W. Fu and Y. S. Yang, Fatigue behavior of friction stir spot welded AZ31 Mg alloy sheet joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 7, 1949–1956, 2013. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62682-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62682-5).
- [30] F. Dahmene, S. Yaacoubi, M. E. Mountassir, G. Porot, M. Masmoudi, P. Nennig, U. F. H. Suhuddin and J. F. Santos, Dataset from healthy and defective spot welds in refill friction stir spot welding using acoustic emission. *Data in Brief*, 45, 108750, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108750>.
- [31] K. Zhang, Z. Zhou and J. Zhou, Application of laser ultrasonic method for on-line monitoring of friction stir spot welding process, *Applied Optics*, 54, 25, 7483, 2015. <https://doi.org/10.1364/ao.54.007483>.
- [32] Z. Zhou and K. Zhang, Evaluation of friction stir spot welding process by laser ultrasonic method with synthetic aperture focusing technique. 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich, Germany, 13-17 June 2016.





Modeling of carbon dioxide electrolysis with reversible fuel cells

Tersinir yakıt hücreleri ile karbondioksit elektrolizinin modellenmesi

Hasan Özcan^{1,*} 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Mechanical Engineering, 06220, Ankara, Türkiye

Abstract

In this study use of a reversible solid oxide fuel cell for co-electrolysis of steam and carbon dioxide is investigated using zero and multi-dimensional modeling tools. A zero-dimensional model is taken into account as the base model and applied to a single-cell system. Dimensions of the cell is used for the zero-dimensional model to provide a base for the multi-dimensional performance enhancement of the cell at micro to macro scales. An optimal current density is available at slightly lower than 1000 A/m² to provide low overpotentials and higher efficiency. Maximum reachable cell efficiency in this case is about 75%.

Keywords: Co-electrolysis, Reversible fuel cells, Carbon dioxide

1 Introduction

High temperature reversible fuel cells known as Solid oxide electrolysis cells (SOEC) or High temperature steam electrolysis (HTSE) are known as promising and effective solutions for a low carbon economy which utilizes electricity and high temperature heat to generate hydrogen from water. SOEC technology can also be used to electrolyze water/CO₂ mixtures from various sources for chemical feedstock production mainly called as syngas.

High temperature co-electrolysis (HTCE) of H₂O/CO₂ is reported as an efficient and a near/long-term cost-effective method, being more energy efficient than separate electrolysis of H₂O and CO₂. The syngas produced can be used as an energy carrier as well as in large scale energy storage [1-3]. This technology can offer an attractive route to decrease CO₂ emissions and facilitate integration of renewable energy technologies [4-7]. For the technology to be feasible enough for operation, some main targets are to be reached such as compatibility, flexibility, adaptability and affordability. Therefore, research is focused on longer life operation for cost-competitiveness with studies being conducted on electrode, cell sealing, electrolyte materials in cell and stack level, balance-of-plant components, and thermal-electrical integration of the processes [8].

Material requirements for the HTSE/HTCE technology have been designated to be high conductivity, compatible thermal expansion, dimensional, thermomechanical, and chemical stability of electrodes; chemically stable interconnect and sealing materials to prevent poisoning, and optimal electronic and ionic conduction of electrolyte for lower overpotentials through operation [9-13]. Some fuel

Öz

Bu çalışmada sıfır ve çok boyutlu modelleme araçları ile tersinir bir yakıt hücresinde buhar ve karbon dioksit elektrolizi incelenmiştir. Temel alınan modeli oluşturmak için sıfır boyutlu bir model göz önüne alınmış ve sonuçlar tekli bir hücreye uygulanmıştır. Varolan hücrenin boyutları sıfır boyutlu modelde kullanılarak doğrulama yapılmış ve mikro ve makro ölçekte çok boyutlu performans arttırımı için temel oluşturmuştur. Optimum akım yoğunluğu olan 1 kA/m² değerinde düşük aşırı gerilim değerleri elde edilmiş ve yüksek verimlilik sağlanmıştır. Ulaşılabilir en yüksek verim %75 olarak gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: İkili elektroliz, Tersinir yakıt hücresi, Karbondioksit

electrode materials that have been used for HTCE operation are Ni-YSZ, LSV and LSCM while CaTiO₃, LSM, LSCF, LSCM-Cu metal-metal, ceramic-metal electrodes are used for the oxygen electrode [14-16]. Some issues with electrode materials can be listed as follows:

- Costly noble metals
- Ni has a thermal mismatch to SZ
- Catalytic properties and stabilities of ceramic electrodes are not optional
- Delamination between oxygen electrode and electrolyte (Some studies are present claiming cycling between SOEC/SOFC mode cures delamination [17-19])
- Cr, B, S, SiO₂ poisoning
- Redox of Ni catalyst causes volume changes in the fuel electrode causing mechanical stresses
- High steam partial pressure and high current density cause formation of a Ni layer on the fuel electrode surface, blocking oxygen transfer [20,21]

Above issues cause degradation, resulting in shorter plant life and higher product costs. Therefore, a major amount of research is focused on degradation studies [22-30]. However, some recent studies show that degradation is decreased down to 1.7-6 % per 1000 hours by altering operational conditions and modifying cell architecture [31-33].

Some institutes working on HTCE technologies are listed below:

- Idaho National Laboratories (INL) [34-36]: Feasibility of HTCEs with SOEC technology.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: h.ozcan@aybu.edu.tr (H. Özcan)

Geliş / Received: 14.09.2023 Kabul / Accepted: 03.10.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1360333

- Northwestern University [37]: Renewables to liquids process with HTCE
- Columbia University [38]: HTCE for sustainable hydrocarbon fuels
- University of South Carolina [39]: Novel electrode materials for HTCE, Combining HTCE and methane partial oxidation
- Riso National Laboratory (RNL): Degradation of SOEC under HTCE mode, Large scale CH₄ and CO₂ storage with HTCEs [40].

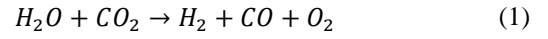
Many other institutions conduct research on HTSE technology for water electrolysis. There are also numerous studies reporting efficiencies, thermal systems integration, topological thermodynamic and economic analysis as well as electrochemical models of HTCE technologies. Some recent studies can be found elsewhere [41-45]. There has been little work related to CO₂ activation process through the stack and diversion between reverse water gas shift reaction and electrolysis for CO production. Research is mainly focused on material/chemistry science of the cell to decrease delamination on oxygen electrodes, decreased cell poisoning, and novel electrode materials for increased life span of HTCE stack. Some studies are carried out for large-scale applications and connection of the HTCE to renewables to improve economic and technological feasibility for practical implementation for sustainable fuels. There is also limited work on electrical energy storage with HTCE technology. Limited number of studies are conducted for integrating HTCE technology to synthetic fuel reactors for liquid fuels production such as Fischer-Tropsch synthesis or other processes for methane, methanol etc. production. Just a couple transient heat-up, start-up models are present for only SOFC mode while there are no available studies for HTSE or HTCE [46]. There are no numerical investigations for effects of thermal expansion in electrodes or thermomechanical stresses on degradation or HTCE operation. There are not enough comprehensive studies made for 1-3D models to study HTCE in cell/stack level under variable operation conditions.

In this paper, a zero-dimensional model is considered as a base model and applied to a single cell system. Dimensions of the single cell is used for the zero-dimensional model to provide a base for the multi-dimensional performance enhancement of the cell with micro to macro scales. Multi-dimensional analysis of the cell is conducted by forming necessary geometric conditions using the COMSOL software package. The main motivation of the research is to model HTCE performance to potentially investigate a more efficient and cost-effective option that can be used as one of the unique technologies for carbon dioxide utilization.

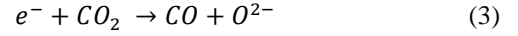
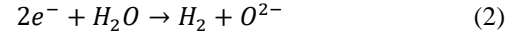
2 Analysis and modeling

2.1 Zero-dimensional modeling

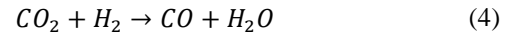
A zero-dimensional model of the HTCE system is initially developed utilizing existing analytical and experimental data. To initiate the electrochemical model, basic chemistry inside the cell is taken into account. The main chemical balance is as follows:



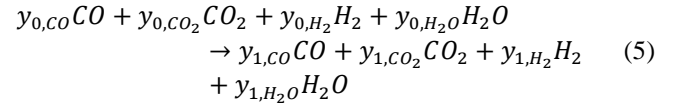
Here, H₂O, CO₂, H₂ and CO are in gas mixture form at the cathode while O₂ is evolved on the anode side. The half-cell reactions are [47]:



There is also reverse water gas shift reaction occurring at certain cell temperatures as:



The open cell potential can be described as a function of cell potential where equilibrium compositions are used to determine the equation. The overall shift reaction occurs during the heat up:



Here subscripts 0 represent cold inlets' molar flow rates while 1 refers to hot outlet before electrolysis. Corresponding balance equations for C, H and O are as follows:

$$y_{0,CO} + y_{0,CO_2} = y_{1,CO} + y_{1,CO_2} \quad (6)$$

$$y_{0,H_2} + y_{0,H_2O} = y_{1,H_2} + y_{1,H_2O} \quad (7)$$

$$y_{0,CO} + y_{0,CO_2} + y_{0,H_2O} = y_{1,CO} + y_{1,CO_2} + y_{1,H_2O} \quad (8)$$

Finally, the equilibrium constant for the shift reaction is:

$$K_{eq}(T) = \frac{y_{1,CO_2}y_{1,H_2}}{y_{1,CO}y_{1,H_2O}} \quad (9)$$

where,

$$\ln(K_{eq}) = \frac{4.92194 \times 10^{-3}}{T} - 7.78386 \times 10^{-1} \ln(T) + 2.5559 \times 10^{-3} T - 5.0983 \times 10^{-7} T^2 - 1.24911 \quad (10)$$

Above equations complete a set of four equations with four unknowns which results in determination of equilibrium composition before electrolysis. With the known equilibrium composition, the Nernst potential can be calculated using the known molar fractions [48]:

$$E_N = \frac{1}{y_{1,CO_2} + y_{1,H_2O}} \left\{ y_{1,H_2O} \left[\frac{-\Delta G_{H_2O}}{2F} - \frac{\bar{R}T}{2F} \ln \left[\frac{y_{1,H_2O}}{y_{1,H_2} y_{1,O_2}^{0.5}} \left(\frac{p}{p_{std}} \right)^{-0.5} \right] \right] \right. \\ \left. + y_{1,CO_2} \left[\frac{-\Delta G_{CO_2}}{2F} - \frac{\bar{R}T}{2F} \ln \left[\frac{y_{1,CO_2}}{y_{1,CO} y_{1,O_2}^{0.5}} \left(\frac{p}{p_{std}} \right)^{-0.5} \right] \right] \right\} \quad (11)$$

Here y_{O_2} is the mole fraction of oxygen in air and assumed as 0.21. In a similar way, electrolysis cell outlet equilibrium composition can be calculated by considering the electrochemical reduction. It should be noted that \bar{R} is the molar universal gas constant, T is cell temperature, F is Faraday's constant and ΔG is the Gibbs free energy of the reaction. Therefore, oxygen evolution at anode should be included in the balance equation and it becomes:

$$y_{1,CO} + y_{1,CO_2} + y_{1,H_2O} = y_{2,CO} + y_{2,CO_2} + y_{2,H_2O} + \Delta n_o \quad (12)$$

Here, Δn_o is the relative molar rate of oxygen:

$$\Delta n_o = \frac{I_e}{2F \dot{N}_{tot}} \quad (13)$$

Where I_e is the total ionic current and \dot{N}_{tot} the total molar flow rate at cathode inlet. Applying necessary balance equations, it is now possible to calculate the amount of syngas produced, power consumed and thermal efficiency of the cell. It should be noted that the minimum required inlet steam and CO_2 molar flow rates should satisfy the following constraint to prevent oxygen starvation in the cell:

$$\dot{N}_{H_2O} + \dot{N}_{CO_2} \geq \frac{I_e}{2F} \quad (14)$$

After securing the calculation of equilibrium gas composition, it is required to determine the total potential of the cell by considering overpotentials. Total cell potential is sum of the Nernst potential and corresponding overpotentials as follows:

$$E_{tot} = E_N + E_{con} + E_{act} + E_{ohm} \quad (15)$$

Where subscripts *con*, *act*, and *ohm* correspond to concentration, activation and ohmic. Activation overpotential is due to the chemical equilibrium state of ions at the electrode-electrolyte interface and due to overcoming of the electrical field occurring through transfer of charged particles. Butler-Volmer equation is generally utilized to determine activation overpotential:

$$j = j_{0,i} \left[\exp\left(\frac{\alpha z F E_{act,i}}{RT}\right) - \exp\left[\frac{-(1-\alpha) z F E_{act,i}}{RT}\right] \right] \quad (16)$$

Where j is current density, j_0 is exchange current density, α is charge transfer coefficient, z is number of transferred electrons, and i represents anode or cathode. When the charge transfer coefficient is 0.5, Butler-Volmer equation takes the following form:

$$j = 2j_{0,i} \sinh\left(\frac{F E_{act,i}}{zRT}\right) \quad (17)$$

Exchange current density can be evaluated as a function of activation energy of each electrode:

$$j_{0,i} = \gamma_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad (18)$$

Where E_i is activation energy for each electrode and γ is pre-exponential factor. Ohmic overpotentials are results of ionic, electronic, and contact resistances which can be given in a general form:

$$E_{ohm} = j \sum \ddot{R}_i \quad (19)$$

Here \ddot{R} is the resistance of each considered layer in the cell that is calculated based on thickness and resistivity of each layer [48]:

$$\ddot{R}_i = \delta_i \rho_i \quad (20)$$

Here, thickness and resistivity of anode, cathode, interconnect, and electrolyte can be considered even though it is known that the highest resistance belongs to electrolyte and the rest in general is neglected. Concentration overpotentials are related to mass transfer limitations on electrodes as well species concentrations. Due to change in concentration of species resulted in current passing through the electrodes a voltage change is also present. The simplest way to determine concentration losses is by introducing limiting current density that is based on mass transfer, electrochemistry, and boundary layer theory:

$$\frac{j_L}{ZF} = -D \frac{c_o}{\delta} \quad (21)$$

where D is diffusivity diameter and c^0 is species concentration and the concentration overpotential is:

$$E_{con} = \frac{RT}{zF} \ln\left(1 - \frac{j}{j_L}\right) \quad (22)$$

There are several other formulated and correlated definitions for concentration overpotentials that can be utilized based on the work being conducted. Finally, efficiency of the cell can be written as the ratio of useful outputs from the cathode to consumed power and required heating. This can be basically determined by writing the energy balance of the system:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_P \dot{N}_i [\Delta H_{f_i}^0 + H_i(T_p) - H_i^0] - \sum_R \dot{N}_i [\Delta H_{f_i}^0 + H_i(T_R) - H_i^0] \quad (23)$$

Where $\Delta H_{f_i}^0$ is enthalpy of formation for each reactant or product while the term $H_i(T_R) - H_i^0$ corresponds to the sensible enthalpy. The efficiency of the cell is:

$$\eta_{cell} = \frac{LHV_{CO} \dot{n}_{CO,2} + LHV_{H_2} \dot{n}_{H_2,2}}{\dot{Q} + E_{tot} J A_{cell} N_{cell}} \quad (24)$$

Where LHV is the lower heating value of the corresponding fuel, A_{cell} is cell area and N_{cell} is number of cells used. Molar flow rates at the exit are calculated based on either a known ionic transfer of oxygen or a known inlet molar flow rate. The H_2/CO ratio is also an important aspect to evaluate its possibility to produce chemical feedstock. Feedstock conversion factor is the rate of converted H_2O/CO_2 to H_2/CO :

$$\psi = \frac{\dot{n}_{in}(y_{0,H_2O} + y_{0,CO_2}) - \dot{n}_{out}(y_{2,H_2O} + y_{2,CO_2})}{\dot{n}_{in}(y_{0,H_2O} + y_{0,CO_2})} \quad (25)$$

It is also possible to simply calculate overpotentials with a term called area specific resistance (ASR) as a function of cell temperature and pressure:

$$E_{tot} = E_N + ASR(T, P) \quad (26)$$

$$ASR = 34.22 \exp(T_{cell} - 273.15) \exp(-0.0217P_{cell}) \quad (27)$$

2.2 Multi-dimensional modeling

COMSOL is utilized for the multi-dimensional modelling work. There are not many available works published or presented for modelling aspects of gas mixtures through a co-electrolysis cell, however, there are many represented for simple H_2 SOEC at cell level as mentioned in the literature review of this work. Therefore, available works for H_2 -SOEC cell configurations are taken into account to validate the modelling results. In addition, in order to decrease the solution time and complexity, it is aimed to decrease the modelling space into 2D. The cell model that is introduced in the zero-dimensional model has been utilized for the multi-dimensional model for a planar cell.

The planar cell configuration geometry is represented in Figure 1. An 8x8 cm cell is designed with anode, electrolyte and cathode while a surface current collector is considered at the upper surface of the cathode. The gas domain is located at the top of the cathode layer with various channels to collect the generated gas. Geometry and physical parameters of the cell that is fed into COMSOL. Channel width and length, gas domain height, cell depth and thickness of electrode/electrolyte layers are provided based on available cell structures. In the case of a cathode supported cell the cathode is three times thicker than anode and electrolyte. Instead of utilizing the material library of COMSOL, some

certain basic physical parameters are considered for common electrode/electrolyte materials such as permeability and porosity of electrodes and conductivity of electrolyte.

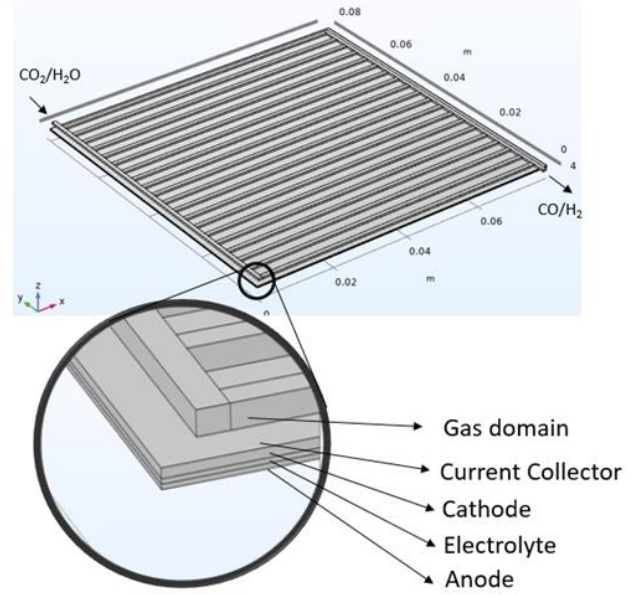


Figure 1. Planar cell configuration

To prevent solution complexity, dimensions of the cell is decreased to 2D. Meshing of the geometry is kept simple and free triangular shaped meshes are considered for all layers of the cell as in Figure 2. No slip condition is assigned for the boundary of the gas domain and the number of boundary layers is taken as four. Four study trees are formed for the analysis of the planar cell design in which the first two considers secondary current distribution alone, the third one integrates Brinkmann equations to take into account the porous media flow while the last one considers Multiphysics of reacting flow and the predefined tools together.

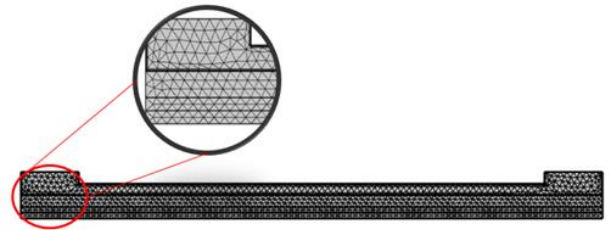


Figure 2. Meshing of the 2D model for co-electrolysis

The momentum, energy and mass equations are dictated by COMSOL through the solution where data manipulation is only required to feed two different gas species. Energy conservation equation becomes challenging when radiative heat transfer is included, therefore it is generally neglected. The energy conservation should be considered as conduction heat transfer in solid structures and convective heat transfer in gas channels. Governing equations for momentum conservation is included for both cathode, anode and channels separately. The general Momentum equation in the gas channels is:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right] + Q_u \quad (28)$$

and

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = Q_M \quad (29)$$

According to Darcy's law Q_u is equal to $-(\varepsilon\mu/K)\vec{v}$ and Q_M is related to current density, where K is permeability and μ is dynamic viscosity.

3 Results and discussion

Results of the zero-dimensional model is provided for thermal and efficiency analysis with validation. Based on the model, effects of temperature, pressure, current density and other major parameters are investigated in order to provide adequate amount of information on optimal operation of the considered cell. Validation of the model is conducted by comparing the cell outlet gas stream's molar fractions at different ionic currents as in Figure 3. The molar fractions of the model and Stoot et al's work are well aligned [5].

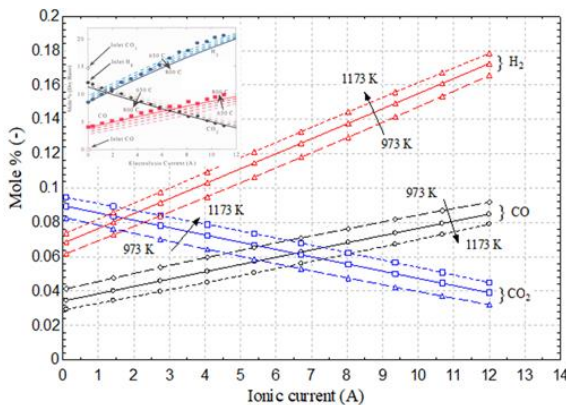


Figure 3. Validation of the existing model with the experimental results represented in [5]

Current density is one of the most influential parameters that effects cell performances overall. Therefore, its variation is critical to figure out certain optimal conditions through the cell when thermodynamic modeling is applied. Higher current density and lower temperature operation expectedly have the negative effect on the cell performance as in Figure 4.

Figure 5 represents effects of current density and temperature change on overpotentials and cell efficiency. An optimal current density is available which is slight lower than 1000 A/m² to provide low overpotentials and higher efficiency. Maximum reachable cell efficiency in this case is abo 75%. The comparatively low current density requirement potentially carries the disadvantage of higher space requirements plus extra materials use for the same number of products compared to legacy systems that produce hydrogen. However, in this case co-electrolysis is only possible with high temperature electrolyzers and making

such a comparison might stand unnecessary. Here, the main motivation is to keep the efficiency of the process as high as possible and capture CO₂.

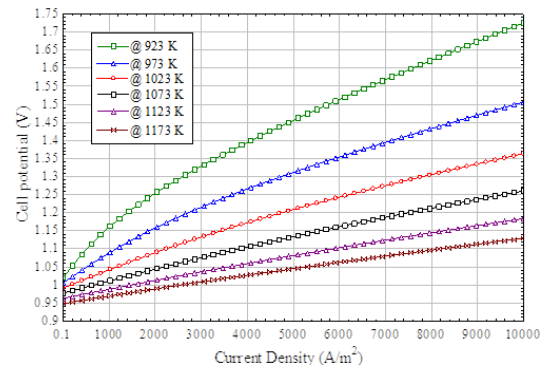


Figure 4. Effect of current density and temperature on cell potential

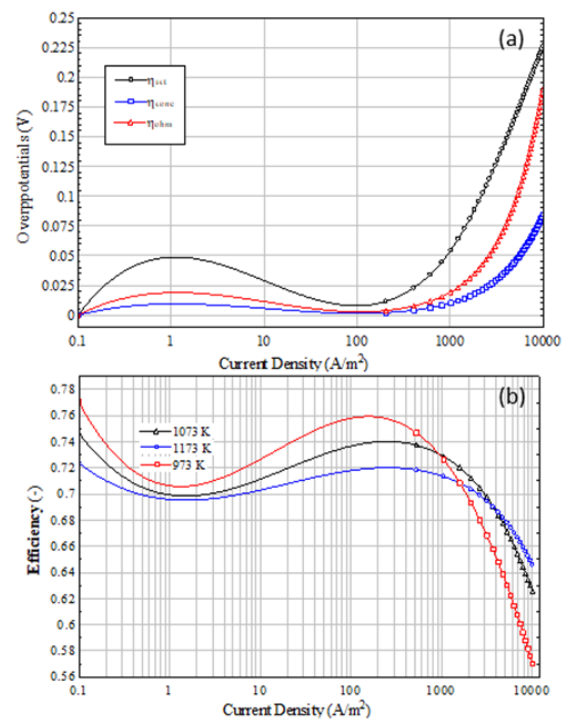


Figure 5. Trend of (a) cell overpotentials and (b) cell efficiency at various current densities

Figure 6 represents result for the model that is based on area specific resistances. Effects of cell temperature and pressure is investigated in this case that higher pressures cause a decrease in cell efficiency up to 1.5 MPa while a significant increase is observed after this value where there should be an upper limit for safer operation, while higher temperature tends to increase the cell efficiency. Higher pressure operation for SOFCs have long been discussed yet shows many added challenges to already complex high temperature operation. However, for the co-electrolysis case, including the thermochemistry of CO₂ presence and CO production equilibrium constant is favoured at a certain pressure range that should be noted down for future investigations.

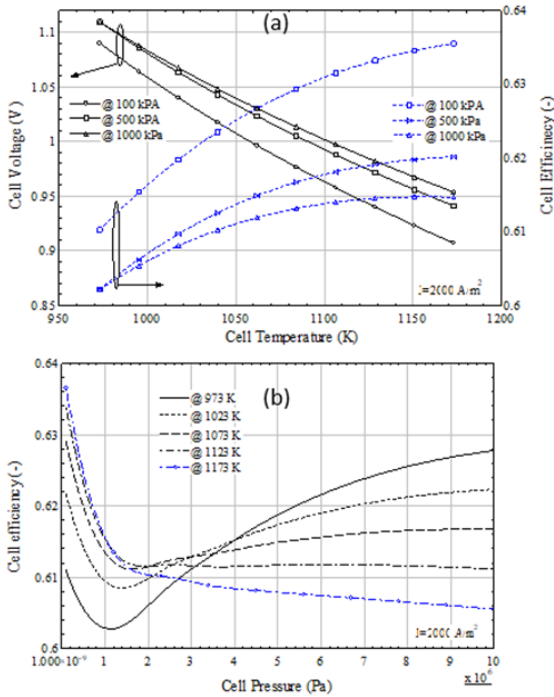


Figure 6. Effects of combined cell temperature and pressure on (a) cell voltage and (b) cell efficiency

Considering cell configurations, SOECs can be planar, tubular, or flat tubular. Early SOEC systems used tubular cells as their geometry. When compared to planar configurations, higher mechanical and thermal stability can be achieved with tubular configurations. Sealing of the cell is also much easier in tubular configurations than that of flat-plate configurations as the sealing area is significantly reduced. However, planar designs are still being widely adopted due to their much shorter current collection paths and significantly higher volumetric density. Here, for a micro-scale SOEC electrode model ion/electronic charge

transport, mass, momentum, and energy conservation equations should be considered.

Initially the feed stream is considered as water into the cell to observe validity of the model. However, significant amount of meshing in very high number of channels considered in the cell mainly either failed for evaluation or takes significant amount of time for solution, which might be misleading and unnecessary. Therefore, number of channels are decreased to an acceptable level. Electrolyte potential provides a practical range of open cell voltage for the cell with considered overpotentials utilized through the study tree. Figure 7 demonstrates distribution of velocity and electrolyte potential, as well as molar concentrations of water and hydrogen on the cathodic surface. Water is completely consumed and converted into hydrogen as its molarity significantly decreased through the cell inlet/outlet while the opposite occurs for hydrogen.

The 3D model for H_2 -SOEC is then configured into a 2D model for decreased solution complexity in which it is obvious that 3D model does not provide further insight for what was intended to investigate in the part of the study. For the cathodic gas system Kinetic and Brokaw theories are selected for gas diffusivity and viscosity models for CO , CO_2 , H_2 and H_2O system. The oxygen ions transferred to anode has been excluded from the 2D analysis to focus on the cathodic distributions. Secondary current distribution tool is used to model the voltage-current characteristics on the cell by assigning structures for cell layers with geometric and physical parameters. Low velocity flow in porous media is defined using the Brinkmann equations as a ready to use tool in COMSOL. Finally, the Transport of Concentrated species (TCS) tool is utilized to investigate the flow and distribution of substances at the cathode side. Maxwell-Stefan diffusion model is used in this tool while it also considers transport in porous media and migration in an electric field. All substances are assumed as ideal gas and remaining of all calculations are based on ideal gas law.

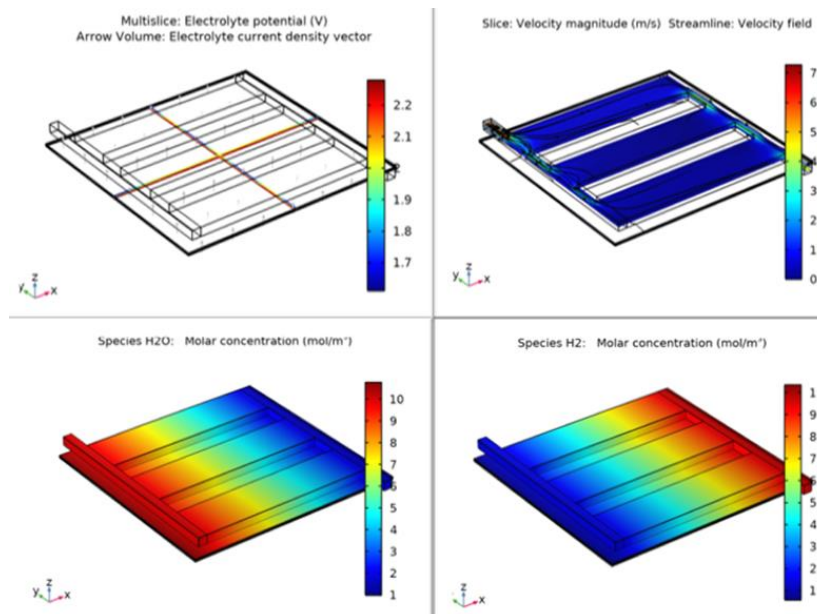


Figure 7. Electrolyte potential, velocity field and molar concentrations for the reference 3D H_2 – SOEC model

Figure 8 represents the electrolyte potential, electrode current density and velocity distributions through the 2D planar cell design. Distributions are well aligned with the 3D design for water electrolysis in co-electrolysis mode. In this case the cell potential is above 1.3V and up to 1.6V, which is expected for the cell in co-electrolysis mode. Current density of the cell is limited to 0.1 A/cm² for this case to prevent solution complexities at high current densities.

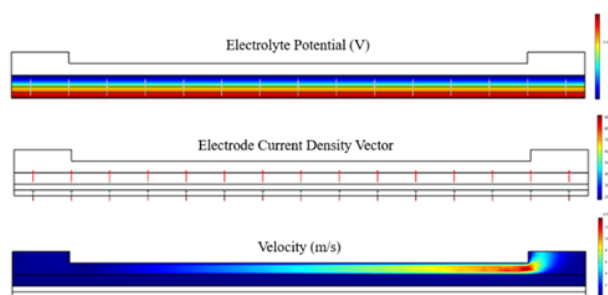


Figure 8. Electrolyte potential, electrode current density and velocity distributions through the 2D planar cell design

Under stoichiometry, the distributions of all chemical species at the cathode side are evaluated. Lower current densities results in lower product conversions and for the case of 0.01 A/cm², 20% fuel utilization can be accomplished while it can be increased up to 60% at higher current densities as recommended in the zero-dimensional model, suggesting that the multi-dimensional model provides acceptable analysis results in parallel to the zero-dimensional model with further details, which is based on experimental results. In this case it may be more convenient to use modelling tools in order to investigate thermal/efficiency characteristics of such cell to create a base for experimentation and utilization of such systems. However, the zero-dimensional model considers basic chemical reactions without considering detailed interactions between reacting substances through the cell and may fall short to provide a better insight. Therefore, utilizing tools in COMSOL provides a better understanding on at least the behavior of substances through a porous media. This alone considers the effect of electrolysis process on the conversion of the feed while the reverse water shift reaction distribution is not taken into account, however, it can be seen that a significant amount of CO production is already accomplished at the inlet. The zero-dimensional model shows that the molar composition of the cell inlet already accomplishes most of the CO production through the RWGS reaction.

4 Conclusions

SOEC technology has long been under research as a reverse SOFC while there have been new initiatives to utilize these cells in power generation industry for energy storage purposes. SOEC technology is an efficient alternative to conventional electrolysis while it also can be used for syngas production due to its high temperature operation. In this

research co-electrolysis of CO₂ and steam, two of the common waste from industry are utilized for recovery and capture of CO₂ to produce syngas, which can make a significant contribution to short/near term zero emission targets. A zero-dimensional model is developed to investigate efficiency aspect of a single planar cell design followed by multi-dimensional analysis of the same cell using COMSOL platform, where COMSOL provides detailed information and a better understanding of the species distributions by considering many more theoretical tools and Multiphysics modelling. The fuel utilization factor may be as high as 60% under similar current density-voltage conditions while the species distribution results show that the H₂ to CO ratio is at an acceptable range that they can be further utilized for methane or liquid fuel synthesis. COMSOL can be used to expand the studies not only for single cell design but also at stack level to understand thermo mechanical trends through operation to understand the causes of degradation and system lifetime.

Acknowledgment

Author acknowledges Imperial College London's Department of Earth Sciences for allowing the author to use the COMSOL workstation.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] A. Körner, C. Tam, S. Bennett and J. Gagné, Technology roadmap-hydrogen and fuel cells. Technical Annex for International Energy Agency (IEA), page 3-7, Paris, France, 29 June 2015.
- [2] B. Lei, B. Samir and T. Enrico. Steam electrolysis by solid oxide electrolysis cells (SOECs) with proton-conducting oxides. *Chemical Society Reviews*, 43(24), 8255-8270, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4CS00194J>
- [3] S. D. Ebbesen, R. Knibbe and M. Mogensen, Co-electrolysis of steam and carbon dioxide in solid oxide cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 159(8), F482, 2012. <https://doi.org/10.1149/2.076208jes>
- [4] S. D. Ebbesen, C. Graves and M Mogensen, Production of synthetic fuels by co-electrolysis of steam and carbon dioxide. *International Journal of Green Energy*, 6(6), 646-660, 2009. <https://doi.org/10.1080/15435070903372577>
- [5] C. M. Stoots, J. E. O'Brien, J. S. Herring and J. J Hartvingsen, Syngas production via high-temperature coelectrolysis of steam and carbon dioxide. *Journal of fuel cell science and technology*, 6, 1, 2009.
- [6] S. D. Ebbesen, C. Graves, A. Hauch, S. H. Hensen and M. Mogensen, Poisoning of solid oxide electrolysis cells by impurities. *Journal of the Electrochemical Society*, 157(10), B1419, 2010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1149/1.3464804>
- [7] N. Q. Minh and M. Mogensen. Reversible solid oxide fuel cell technology for green fuel and power

- production. The electrochemical Society Interface, 22(4), 55, 2013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1149/2.F05134if>
- [8] Y. Zheng, J. Wang, B. Yu, W. Zhang, J. Chen, J. Qiao and J. Zhang, A review of high temperature co-electrolysis of H₂O and CO₂ to produce sustainable fuels using solid oxide electrolysis cells (SOECs): advanced materials and technology. Chemical Society Reviews, 46(5), 1427-1463, 2017. <https://doi.org/10.1039/C6CS00403B>
- [9] T. Wei, P. Singh, Y. Gong, J. B. Goodenough, Y. Huang and K. Huang, Sr 3– 3x Na 3x Si 3 O 9– 1.5 x (x= 0.45) as a superior solid oxide-ion electrolyte for intermediate temperature-solid oxide fuel cells. Energy & Environmental Science, 7(5), 1680-1684, 2014. <https://doi.org/10.1039/C3EE43730B>
- [10] Y. Wang, T. Liu, S. Fang and F. Chen, Syngas production on a symmetrical solid oxide H₂O/CO₂ co-electrolysis cell with Sr₂Fe_{1.5}Mo_{0.5}O_{6–Sm0.2}Ce_{0.8}O_{1.9} electrodes. Journal of Power Sources, 305, 240-248, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.11.097>
- [11] Q. Liu, C. Yang, X. Dong and F. Chen. Perovskite Sr₂Fe_{1.5}Mo_{0.5}O_{6–δ} as electrode materials for symmetrical solid oxide electrolysis cells. International Journal of Hydrogen Energy, 35(19), 10039-10044, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.016>
- [12] T. Chen, M. Liu, Y. Zhou, X. Ye and Z. Zhan, High performance of intermediate temperature solid oxide electrolysis cells using Nd₂NiO_{4+δ} impregnated scandia stabilized zirconia oxygen electrode. Journal of Power Sources, 276, 1-6, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.042>
- [13] J. Li, C. Zhong, X. Meng, H. Wu, H. Nie, Z. Zhan and S. Wang, Sr₂Fe_{1.5}Mo_{0.5}O_{6–δ}-Zr_{0.84}Y_{0.16}O_{2–δ} Materials as Oxygen Electrodes for Solid Oxide Electrolysis Cells. Fuel Cells, 14(6), 1046-1049, 2014. <https://doi.org/10.1002/fuce.201400021>
- [14] C. Graves, S. D. Ebbesen and M. Mogensen, Co-electrolysis of CO₂ and H₂O in solid oxide cells: performance and durability. Solid State Ionics, 192(1), 398-403, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.06.014>
- [15] W. Li, H. Wang, Y. Shi and N. Cai, Performance and methane production characteristics of H₂O–CO₂ co-electrolysis in solid oxide electrolysis cells. International journal of hydrogen energy, 38(25), 11104-11109, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.008>
- [16] C. Stoots., J. O'Brien and J. Hartvigsen, Results of recent high temperature coelectrolysis studies at the Idaho National Laboratory. International Journal of Hydrogen Energy, 34(9), 4208-4215, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.029>
- [17] K. Chen, S. Liu, N. Ai, M. Koyama and S. P. Jiang, Why solid oxide cells can be reversibly operated in solid oxide electrolysis cell and fuel cell modes?. Physical Chemistry Chemical Physics, 17(46), 31308-31315, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5CP05065K>
- [18] C. Graves, S. D. Ebbesen, S. H. Jensen, S. B. Simonsen and M. Mogensen, Eliminating degradation in solid oxide electrochemical cells by reversible operation. Nature materials, 14(2), 239-244, 2015. <https://doi.org/10.1038/NMAT4165>
- [19] G. A. Hughes, K. Yakal-Kremski and S. A. Barnett, Life testing of LSM–YSZ composite electrodes under reversing-current operation. Physical Chemistry Chemical Physics, 15(40), 17257-17262, 2013. <https://doi.org/10.1039/C3CP52973H>
- [20] A. Hauch, S. D. Ebbesen, S. H. Jensen and M. Mogensen, Solid oxide electrolysis cells: Microstructure and degradation of the Ni/yttria-stabilized zirconia electrode. Journal of the Electrochemical Society, 155(11), B1184, 2008. <https://doi.org/10.1149/1.2967331>
- [21] A. Hauch, S. H. Jensen, J. B. Bilde-Sørensen and M. Mogensen, Silica segregation in the Ni/YSZ electrode. Journal of the Electrochemical Society, 154(7), A619, 2007. <https://doi.org/10.1149/1.2733861>
- [22] M. A. Laguna-Bercero, J. A. Kilner and S. J. Skinner, Development of oxygen electrodes for reversible solid oxide fuel cells with scandia stabilized zirconia electrolytes. Solid State Ionics, 192(1), 501-504, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.01.003>
- [23] W. Wang, Y. Huang, S. Jung, J. M. Vohs and R. J. Gorte, A comparison of LSM, LSF, and LSCo for solid oxide electrolyzer anodes. Journal of the Electrochemical Society, 153(11), A2066, 2006. <https://doi.org/10.1149/1.2345583>
- [24] P. Hjalmarsson, X. Sun, Y. L. Liu and M. Chen, Influence of the oxygen electrode and inter-diffusion barrier on the degradation of solid oxide electrolysis cells. Journal of power sources, 223, 349-357, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.08.063>
- [25] K. Chen and N. Ai, Development of (Gd, Ce) O₂-impregnated (La, Sr) MnO₃ anodes of high temperature solid oxide electrolysis cells. Journal of the Electrochemical Society, 157(11), P89, 2010. <https://doi.org/10.1149/1.3481436>
- [26] B. Yu, W. Zhang, J. Xu, J. Chen, X. Luo and K. Stephan, Preparation and electrochemical behavior of dense YSZ film for SOEC. International journal of hydrogen energy, 37(17), 12074-12080, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.063>
- [27] W. Zhang, B. Yu and J. Xu, Investigation of single SOEC with BSCF anode and SDC barrier layer. International journal of hydrogen energy, 37(1), 837-842, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.04.049>
- [28] R. Xing, Y. Wang, Y. Zhu, S. Liu and C. Jin, Co-electrolysis of steam and CO₂ in a solid oxide electrolysis cell with La_{0.75}Sr_{0.25}Cr_{0.5}Mn_{0.5}O_{3–δ}-Cu ceramic composite electrode. Journal of Power Sources, 274, 260-264, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.066>
- [29] T. Chen, M. Liu, C. Yuan, Y. Zhou, X. Ye, Z. Zhan, C. Xia and S. Wang, High performance of intermediate temperature solid oxide electrolysis cells using

- Nd₂NiO₄+ δ impregnated scandia stabilized zirconia oxygen electrode. *Journal of Power Sources*, 276, 1-6, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.042>
- [30] T. Ogier, J. M. Bassat, F. Mauvy, S. Fourcade, J. C. Grenier, K. Couturier, M. Petitjean and J. Mougín, Enhanced performances of structured oxygen electrodes for high temperature steam electrolysis. *Fuel Cells*, 13(4), 536-541, 2013. <https://doi.org/10.1002/fuce.201200201>
- [31] J. Schefold, A. Brisse and F. Tietz, Nine thousand hours of operation of a solid oxide cell in steam electrolysis mode. *Journal of the Electrochemical Society*, 159(2), A137, 2011. <https://doi.org/10.1149/2.076202jes>
- [32] P. Moçoteguy and A. Brisse, A review and comprehensive analysis of degradation mechanisms of solid oxide electrolysis cells. *International journal of hydrogen energy*, 38(36), 15887-15902, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.045>
- [33] M. S. Sohal, J. E. O'Brien, C. M. Stoots, V. L. Sharma, B. Yildiz and A. Virkar, Degradation issues in solid oxide cells during high temperature electrolysis. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 9(1), 2012. <https://doi.org/10.1115/1.4003787>
- [34] G. L. Hawkes, J. E. O'Brien, C. M. Stoots and R. Jones, 3D CFD Model of High Temperature H₂O/CO₂ Co-Electrolysis. ANS Summer Meeting, Boston, June 24, 2007. <https://www2.ans.org/meetings/docs/2007/am2007-official.pdf>
- [35] J. E. O'Brien, M. G. McKellar, C. Stoots, J. S. Herring and G. L. Hawkes, Parametric study of large-scale production of syngas via high-temperature co-electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9), 4216-4226, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.021>
- [36] M. G. McKellar, J. E. O'Brien, C. M. Stoots and G. L. Hawkes, Process Model for the Production of Syngas Via High Temperature Co-Electrolysis. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, vol. 43009, pp. 691-699, 2007. <https://doi.org/10.1115/IMECE2007-43658>
- [37] Z. Zhan, W. Kobsiriphat, J. R. Wilson, M. Pillai, I. Kim and S. A. Barnett, Syngas production by coelectrolysis of CO₂/H₂O: the basis for a renewable energy cycle. *Energy & Fuels*, 23(6), 3089-3096, 2009. <https://doi.org/10.1021/ef900111f>
- [38] C. R. Graves, Recycling co₂ into sustainable hydrocarbon fuels: Electrolysis of co₂ and h₂o. Doctoral dissertation, Columbia University, USA, 2010.
- [39] Y. Wang, T. Liu, S. Fang, G. Xiao, H. Wang and F. Chen, A novel clean and effective syngas production system based on partial oxidation of methane assisted solid oxide co-electrolysis process. *Journal of Power Sources*, 277, 261-267, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.092>
- [40] N. Q. Minh and M. B. Mogensen, Reversible solid oxide fuel cell technology for green fuel and power production. *The electrochemical Society Interface*, 22(4), 55, 2013. <https://doi.org/10.1149/2.F05134if>
- [41] Y. Wang, Y. Du, M. Ni, R. Zhan, Q. Du and K. Jiao, Three-dimensional modeling of flow field optimization for co-electrolysis solid oxide electrolysis cell. *Applied Thermal Engineering*, 172, 114959, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114959>
- [42] Y. Chen, Y. Luo, Y. Shi and N. Cai, Theoretical modeling of a pressurized tubular reversible solid oxide cell for methane production by co-electrolysis. *Applied Energy*, 268, 114927, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114927>
- [43] D. Y. Lee, M. T. Mehran, J. Kim, S. Kim, S. B. Lee, R. H. Song, E. Y. Ko, J. E. Hong, J. Y. Huh and T. H. Lim, Scaling up syngas production with controllable H₂/CO ratio in a highly efficient, compact, and durable solid oxide coelectrolysis cell unit-bundle. *Applied Energy*, 257, 114036, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114036>
- [44] E. P. Reznicek and R. J. Braun, Reversible solid oxide cell systems for integration with natural gas pipeline and carbon capture infrastructure for grid energy management. *Applied Energy*, 259, 114118, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114118>
- [45] A. P. Kulkarni, T. Hos, M. V. Landau, D. Fini, S. Giddey and M. Herskowitz, Techno-economic analysis of a sustainable process for converting CO₂ and H₂O to feedstock for fuels and chemicals. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(2), 486-500, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0SE01125H>
- [46] C. O. Colpan, F. Hamdullahpur and I. Dincer, Heat-up and start-up modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195(11), 3579-3589, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.021>
- [47] C. M. Stoots, J. E. O'Brien, J. Herring and J. J. Hartvigsen, Syngas production via high-temperature coelectrolysis of steam and carbon dioxide, *J. Fuel Cell Sci. Technol*, 6(1): 011014, 2009. <https://doi.org/10.1115/1.2971061>
- [48] J. P. Stempien, O. L. Ding, Q. Sun and S. H. Chan, Energy and exergy analysis of Solid Oxide Electrolyser Cell (SOEC) working as a CO₂ mitigation device. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(19), 14518-14527, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.065>

