

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 14 Sayı: 1 2025
Volume: 14 Issue: 1 2025



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 Üniversitesi, Türkiye*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/*Hubei University University of Hubei, 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. Yonca Yüceer

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye/*Çanakkale Onsekiz Mart 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. Zeliha Yıldırım	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Sencer Buzrul	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan	Endüstri Mühendisliği Industrial engineering
Prof. Dr. Hasan Tangüler	Gıda Mühendisliği Food 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
Prof. Dr. Yasin Kabalcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Prof. Dr. Kutalmış Gümüş	Harita Mühendisliği Geomatics Engineering
Prof. Dr. Aydın Yeşildirek	Mekatronik Mühendisliği Mechatronics Engineering
Prof. Dr. Arzum Büyükkelik	Endüstri Mühendisliği Industrial 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. 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. Dr. Tolga Kaynak	Harita Mühendisliği <i>Geomatics Engineering</i>
Arş. Gör. Yasemen İnce Keser	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Arş. Gör. Yusuf Can Turanoğlu	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Arş. Gör. Dr. Katibe Sinem Coruk	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>

Dil Editörleri/Language Editors

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

Research Article /Araştırma Makalesi

Raspberry Pi 3 based cloud supported temperature-controlled spectrophotometer design

Raspberry Pi 3 tabanlı, bulut destekli, sıcaklık kontrollü spektrofotometre tasarımı

Osman Çağatay Değirmenci, Veysel Gökhan Böcekçi, *Pınar Özkan

1-9

Araştırma Makalesi/Research Article

PPK yöntemi ile İHA verilerinden üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin konumsal doğruluğunun araştırılması: Antarktika'daki Horseshoe Adası örneği

Investigation of the positional accuracy of orthophoto and DEM Products generated from UAV data with the PPK method: A case study of Horseshoe Island, Antarctica

***Esra Günaydın, Mahmut Oğuz Selbesoğlu, Mustafa Fahri Karabulut, Oleg Vassilev, Burak Akpınar, Mustafa Yanalak, Özgün Oktar, Burcu Özsoy**

10-17

Araştırma Makalesi/Research Article

Kırmızıbiberin vakum destekli mikrodalga tekniği ile kurutulması

Drying of red pepper by microwave-vacuum technique

***Cem Baltacıoğlu, Duygu Boz**

18-26

Research Article /Araştırma Makalesi

Investigating the influence of machining parameters and tool coatings on surface quality of titanium parts in aerospace industry

Havacılık endüstrisinde titanyum parçaların yüzey kalitesi üzerindeki işleme parametrelerinin ve takım kaplamalarının etkisinin araştırılması

Burak Kaymak, *Fahrettin Öztürk

27-35

Araştırma Makalesi/Research Article

Sülfürleme süresinin sulu çözelti karışımı ile hazırlanan Cu₂SnS₃ ince filmlerin özellikleri üzerine etkisi

Effect of sulfurization time on the properties of Cu₂SnS₃ thin films prepared with aqueous solution mixture

***Sevde Erkan, Yavuz Atasoy, Mehmet Ali Olğar, Recep Zan**

36-43

Araştırma Makalesi/Research Article

Levrek (*Dicentrarchus labrax*) derisinden jelatin ekstraksiyonu: Fonksiyonel, tekstürel ve spektroskopik özellikler üzerine bir araştırma

*Extraction of gelatin from sea bass (*Dicentrarchus labrax*) skin: an investigation on functional, textural, and spectroscopic properties*

***Ümran Cansu**

44-51



Research Article / Araştırma Makalesi

Investigation of the effect of current density and ZrO₂ bath concentration on electrodeposited Ni-P/ZrO₂ composite coatings

Akım yoğunluğu ve ZrO₂ banyo konsantrasyonunun elektrodelenmiş Ni-P/ZrO₂ kompozit kaplamalar üzerindeki etkisinin incelenmesi

***Ömer Hükümdar, Umut Kumlu, Ali Keskin, Mustafa Atakan Akar,
Muhammed Fatih Geçkin, Eda Nur Çamcı, Alperen Yılmaz**

52-59

Araştırma Makalesi/Research Article

Demir katkılı zeolitik imidazol ağ yapısı katalizörler kullanılarak fenton benzeri oksidasyonu ile kristal viyole gideriminde reaksiyon parametrelerinin ve kinetiğinin incelenmesi

Investigation of reaction parameters and kinetics for crystal violet removal by fenton-like oxidation using iron-doped zeolitic imidazole framework catalysts

***Esra Yılmaz Mertsoy, Burcu Palas**

60-69

Araştırma Makalesi/Research Article

Melanomanın yüzeyde zenginleştirilmiş Raman spektroskopisi ile tespitinde ortama eklenen serumun sınıflandırma başarısı üzerine etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of serum added to the medium on the classification success in the detection of melanoma using surface-enhanced Raman spectroscopy

***Fatma Uysal Çiloğlu**

70-79

Research Article / Araştırma Makalesi

Fuzzy logic-based simulation and modelling of grid integration renewable energy systems for sustainable energy

Fuzzy logic-based simulation and modelling of grid integration renewable energy systems for sustainable energy

***Yavuz Bahadır Koca**

80-89

Araştırma Makalesi/Research Article

Kamu kurumlarında sıfır atık yönetim sisteminin uygulanması: Su ve kanalizasyon idareleri üzerine bir inceleme

Implementation of zero waste management system in public institutions: A study on water and sewerage administrations

Zehra Özger Koçak, *Hüseyin Güven

90-106

Araştırma Makalesi/Research Article

Yay-Şekilli silindirik sandviç kompozit yapıların düşük hızlı darbe performanslarının farklı vurucu tipleri ve darbe açıları için incelenmesi

Investigation of low velocity impact performance of cylindrical sandwich structures arc-shaped core with different impact types and impact angles

***İlyas Bozkurt**

107-121

Research Article / Araştırma Makalesi

Spatial assessment of urban heat island (UHI) in Kütahya using Landsat-8 satellite data

Landsat-8 uydu verilerini kullanarak Kütahya'daki kentsel ısı adasının (UHI) mekansal değerlendirmesi

***Ali Samet Öngen, Enes Zengin**

122-131



Research Article / Araştırma Makalesi

Improvement of bread kadayıf formulation with wheat germ addition and different fermentation methods

Ekmek kadayıfı formülasyonunun ruşeym katkısı ve farklı fermantasyon yöntemleriyle geliştirilmesi

Zeliha Fidan, *Kübra Aktaş

132-140

Araştırma Makalesi/Research Article

Transfer öğrenme kullanılarak geri dönüşüm atıklarının sınıflandırılması

Classification of recycling waste using transfer learning

Büşra Betül Çavuşoğlu, *Hasan Badem

141-151

Araştırma Makalesi/Research Article

Sistem tanımlama yöntemi kullanılarak çeyrek araç süspansiyon sisteminin dinamik modelinin tahmini

Estimation of dynamic model of quadrant vehicle suspension system using system identification method

***Murat Çatalkaya**

152-160

Araştırma Makalesi/Research Article

Meta sezgisel arama algoritmalarının çok seviyeli görüntü eşikleme performanslarının karşılaştırılması

Comparison of multi-level image thresholding performances of meta-heuristic search algorithms

***Asuman Günay Yılmaz, Samoua Alsamoua**

161-174

Araştırma Makalesi/Research Article

Derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile sosyal medya verilerinden suç tespiti

Crime detection on social media data using deep learning and machine learning methods

***Sultan Zeybek, Berat Alkın, Yusuf Kaya**

175-182

Research Article / Araştırma Makalesi

Comparison of machine learning methods for limited predictive maintenance

Kısıtlı kestirimci bakım için makine öğrenmesi yöntemlerinin kıyası

Timur Özkul, *Ayça Topallı

183-191

Araştırma Makalesi/Research Article

Dolgunuz ve hibrit kompozitlerin delme performansının ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of drilling performance and mechanical properties of unfilled and hybrid composites

***Hüseyin Gürbüz, Şehmus Baday, Mehmet Emin Demir, İbrahim Halil Akcan**

192-200

Araştırma Makalesi/Research Article

Yüksek gerilim porselen izolatör sırlarında mermer atık tozunun alternatif hammadde olarak kullanımı

Using marble waste dust as an alternative raw material in glazes for high voltage porcelain insulators

Aliosman Tiryaki, *Müge Tarhan

201-208

Araştırma Makalesi/Research Article

Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile yanal yüklü kazıkların statik analizi

Static analysis of laterally loaded piles by complementary functions method

**Ahmad Reshad Noori, Zahraa Razzaq Kareem Alhachami, *Bilge Sultan Demirtaş,
Suleiman Ali Suleiman Mohamed Khatrush**

209-217

Araştırma Makalesi/Research Article

Konya ili tarım topraklarında mikroplastik kirlilik yükünün araştırılması

Investigation of microplastic pollution load in agricultural soils of Konya province

Senar Aydın, Arzu Ulvi, *Fatma Bedük, Mehmet Emin Aydın

218-233

Araştırma Makalesi/Research Article

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-Cu-Mg alaşımlarının mikroyapı ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the microstructure and tribological properties of Al-Cu-Mg alloys produced by powder metallurgy

***Murat Beder**

234-243

Araştırma Makalesi/Research Article

Kinoa protein-fenolik filmlerin karakterizasyonu: 4-hidroksibenzoik asit konsantrasyonunun etkisi

Characterization of quinoa protein-phenolic films: Impact of 4-hydroxy benzoic acid concentration

***Mehmet Şükrü Karakuş**

244-250

Research Article/Araştırma Makalesi

Harnessing deep learning for multi-class weed species identification in agriculture

Tarımda çok sınıflı yabancı ot türlerinin tanımlanması için derin öğrenmenin kullanımı

***Ebru Ergün**

251-262

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı kodlama tekniklerinin KNN algoritmasının mantar sınıflandırma performansı üzerindeki etkisi

Effect of different encoding techniques on the mushroom classification performance of KNN algorithm

***Kadir İleri**

263-270

Research Article/Araştırma Makalesi

Grid interconnection solutions and power quality enhancement for a battery-supported hybrid PV system

Batarya destekli bir hibrit PV sistemi için şebeke bağlantı çözümleri ve güç kalitesinin iyileştirilmesi

***Batuhan Güzey, Helin Bozkurt, Ahmet Teke**

271-281

Araştırma Makalesi/Research Article

Araç özel ağırları tabanlı kaza bilgilendirme sistemi-KABİS

Accident information system based on vehicular ad hoc networks-KABIS

Muhammed Ali Beşli, *Muhammed Enes Bayraktar

282-288

Research Article/Araştırma Makalesi

Computational and experimental investigation of water surface around bridge piers

Köprü ayakları etrafındaki su yüzeyinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi

Mesut Çelik, *Mücella İlkentapar, Serhat Akşit, Ahmet Alper Öner

289-296

Araştırma Makalesi/Research Article

Şebeke bağlantılı fotovoltaik panel destekli elektrikli araç şarj istasyonlarının analizi

Analysis of grid-connected photovoltaic panel assisted electric vehicle charging stations

***Enes Talha Tamgacı, Murat Ünlü**

297-307

Research Article/Araştırma Makalesi

Tracking seasonal coastal dynamics of Ağyatan wetland using object-based Classification and Regression Tree

Nesne tabanlı Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı kullanılarak Ağyatan sulak alanının mevsimsel kıyı dinamiklerinin izlenmesi

Mustafa Hayri Kesikoğlu, *Tolga Kaynak

308-317

Araştırma Makalesi/Research Article

Ticari soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının kalite kriterlerinin, oksidatif stabilite ve yağ asidi kompozisyonlarının belirlenmesi

Determination of the quality criteria, oxidative stability, and fatty acid composition of commercial cold-pressed flaxseed and hempseed oils

***Kutlu Çevik, Hamza Alaşalvar, Hasan Yalçın**

318-324

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye'de 6 Şubat 2023'te meydana gelen depremlerin farklı gün ve saatlerdeki konumsal etkilerinin internet tabanlı GNSS değerlendirme servisleri ile istatistiksel analizi

Statistical analysis of the positional effects of earthquakes in Türkiye on February 6, 2023 on different days and times with web-based GNSS evaluation services

Selim Şaşa, Kutalmış Gümüş, Münevver Gizem Gümüş

325-339

Research Article/Araştırma Makalesi

Deep learning classification and object detection in helicopter images: Performance analysis of GoogleNet, AlexNet and YOLOv9c architectures

Helikopter görüntülerinde derin öğrenme ile sınıflandırma ve nesne tespiti: GoogleNet, AlexNet ve YOLOv9c mimarilerinin performans analizi

İrem Hatice Doğan, Ozan Arslan, Ayşe Betül Tat, Burhan Şahin, *Ege Erberk Uslu, İbrahim Yülüce, Orhan Dağdeviren

340-349

Araştırma Makalesi/Research Article

Malatya ilinde ICONA yöntemi ile CBS ve uzaktan algılama tabanlı erozyon risk analizi

Erosion risk analysis in Malatya province using the ICONA method based on GIS and remote sensing

Sevgi Bilgiç, *Selman Er

350-359



Research Article/Araştırma Makalesi

The effect of air-cooling heat treatment on the microstructure and phase transformations of structural steels

Yapı çeliklerinin mikroyapısı ve faz dönüşümleri üzerine hava soğutmalı ısıtma işleminin etkisi

***Semih Mahmut Aktarer**

360-369

Araştırma Makalesi/Research Article

Katı oksit yakıt pili cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının çalışma sonrası metalik ara bağlantılardan bertarafı

Removal of solid oxide fuel cell glass-ceramic sealants from metallic interconnectors after operation

***Tolga Altan**

370-381

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı standartlaştırılmış indis yöntemleri ile Bartın ilinin meteorolojik kuraklıklarının analizi

Analysis of meteorological droughts of Bartın province with different standardized drought index methods

***Emre Ablak, Ecem Tuncer Uysal, Ahmet Kumanlıoğlu**

382-391

Review Article/Derleme Makalesi

Taxonomy of sensor fusion techniques for various application areas: A review

Çeşitli uygulama alanları için sensör füzyon tekniklerinin taksonomisi: Bir inceleme

Hande Çavşi Zaim, Esra N. Yolaçan

392-411

Derleme Makalesi /Review Article

Per- ve Polifloroalkil maddelerin (sonsuz kimyasalların) çevredeki kalıcılığı, yayılımı, birikimi ve sağlığa etkileri

Persistence, distribution, accumulation and health effects of forever chemicals (Per- and Polyfluoroalkyl Substances) in the environment

Meral Yurtsever

412-423

Derleme Makalesi /Review Article

Tahıllarda bulunan antosiyaninler ve sağlık üzerine etkileri

Anthocyanins in grains and their effects on health

Yavuz Yüksel

424-435



Raspberry Pi 3 based cloud supported temperature-controlled spectrophotometer design

Raspberry Pi 3 tabanlı, bulut destekli, sıcaklık kontrollü spektrofotometre tasarımı

Osman Çağatay Değirmenci¹ , Veysel Gökhan Böcekçi² , Pınar Özkan^{3,*} 

^{1,2,3}Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

Abstract

Spectrophotometers are a kind of photometers that are used to find the amount of substance in the solution. Spectrophotometers detect the amount of radiation that is not absorbed by the solution in the sample chamber and gives information about the amount of substance in the sample. Spectrophotometers are used in many different fields such as chemistry, medicine, geology, environmental engineering and agriculture. Samples that will directly affect people, such as wastewater, drinking water, pharmaceuticals, are analyzed with high accuracy and possible hazards are avoided. In this study, a device that can be used in the detection of Salmonella bacteria is modeled. In addition, the fact that the heater unit of the device is on the test mechanism eliminates the need for heating in the external environment and the test data can be saved in the cloud environment over the internet connection, which is the novelty of this study. A spectrophotometer device was developed using Raspberry Pi 3 and Python software language. A 470 nm optical filter was used in the device. In addition to the features of standard spectrophotometers, the heating feature that can keep the sample temperature at the desired value has been added. This feature has been developed using the on-off logic method. Linear regression of optical measurements, R^2 value was calculated as 0.9982 in density tests between 0.1 gram and 0.2 gram. The device was developed with a Raspberry Pi 3 minicomputer, it does not need an external computer for use. Thanks to the internet connection ability of Raspberry Pi 3, the analysis results are transferred to the cloud environment, allowing the user to see the results even when they are not at the device.

Keywords: Raspberry Pi, Spectrophotometer, Python, Cloud environment, On-off control

1 Introduction

Spectrophotometers find the amount of target material in the sample by the ratio of the amount of light sent to the sample and the amount of light reaching the detector by passing through the sample. Analysis can be made in many different areas with spectrophotometers. E.g; It is used in many different fields such as the analysis of body fluids in medicine [1], soil and nutrient analysis in agriculture and food [2], elemental analysis in chemistry [3], water analysis

Öz

Spektrofotometreler, çözeltilerdeki madde miktarını bulmak için kullanılan bir tür fotometredir. Spektrofotometreler, numune haznesindeki çözelti tarafından absorbe edilmeyen radyasyon miktarını tespit eder ve numunedeki madde miktarı hakkında bilgi verir. Spektrofotometreler kimya, tıp, jeoloji, çevre mühendisliği ve tarım gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Atık su, içme suyu, ilaç gibi insanları doğrudan etkileyecek numuneler yüksek doğrulukla analiz edilmekte ve olası tehlikelerin önüne geçilmektedir. Bu çalışmada Salmonella bakterilerinin tespitinde kullanılabilecek bir cihaz modellenmiştir. Cihazın ısıtıcı ünitesinin test mekanizması üzerinde olması, dış ortamda ısıtma ihtiyacını ortadan kaldırmıştır ve test verilerinin internet bağlantısının mevcut olması durumunda bulut ortamında saklanabilmesi, bu çalışmanın sağladığı avantajdır. Raspberry Pi 3 ve Python yazılım dili kullanılarak bir spektrofotometre cihazı geliştirilmiştir. Cihazda 470 nm optik filtre kullanılmıştır. Standart spektrofotometrelerin özelliklerine ek olarak numune sıcaklığını istenilen değerde tutabilen ısıtma özelliği eklenmiştir. Bu özellik açma-kapama yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Optik ölçümlerin lineer regresyonu, 0.1 gram ile 0.2 gram arasındaki yoğunluk testlerinde R^2 değeri 0.9982 olarak hesaplanmıştır. Cihaz Raspberry Pi 3 mini bilgisayar ile geliştirilmiştir, ayrıca harici bir bilgisayara ihtiyaç duyulmamaktadır. Raspberry Pi 3'ün internete bağlanabilme özelliği sayesinde analiz sonuçları bulut ortamına aktarılarak, kullanıcının cihaz başında değilken bile sonuçları görebilmesi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Raspberry Pi, Spektrofotometre, Python, Bulut ortamı, Aç-kapa kontrolü

in environmental engineering [4], mineral analysis in geology [5]. According to Karaman et al. investigated the effect of gender and age on tooth color by measuring with a spectrophotometer in the teeth of 345 volunteers aged between 15 and 76 years [6]. Açıkgöz analyzed the water with a UV spectrophotometer and organic reagents and identified some metals in it [7]. Şenol et al. detected Lactic acid bacteria in traditional fermented foods in Turkey with

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: pınar.ozkan@marmara.edu.tr (P. Özkan)
Geliş / Received: 21.03.2024 Kabul / Accepted: 06.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1456578

FTIR-spectrophotometer [8]. Olawale and Oyawale performed the chemical analysis of rice husk waste produced during rice milling in Nigeria with an AA spectrophotometer [9]. Guntarti et al. performed lard analysis in sausages by FTIR-spectrophotometer [10]. With the development of technology, development boards and many components have become cheaper. In this way, it has become possible to develop spectrophotometers at very low costs and small sizes. Spectrophotometers are developing in line with the technical recommendations set by the International Commission on Illumination (CIE) [11]. Compared to old technologies, device designs developed with new development boards have become more compact and portable. In addition to its low cost, there is a tremendous reduction in usage areas. With the expansion of the internet network and the development of cloud technologies, the devices can store the measurement results in recording devices in other areas without the need for high recording volumes. Zhang et al. developed a portable spectrophotometer for water analysis. In the spectrophotometer they developed with LED, photodiode and microcontroller, they analyzed 45 different substances such as chromium and arsenide at wavelengths of 630, 605, 560, 515, 455 and 420 nm [4]. Chaianantakul et al. developed a mini spectrophotometer using an LED as the light source for plasma glucose detection [12]. Laganovska et al. have developed a spectrophotometer capable of measuring in the wavelength range of 450 to 750 nm, which can be controlled by a smart phone with a bluetooth module. They found that they got better results than low-cost spectrophotometers in comparative measurements [13]. Hosker has developed a low-cost spectrophotometer that can measure at 430 and 630 nm with the application she wrote for the light sensor of a smart phone [14]. Taha et al. developed a spectrophotometer using a phone camera as the light sensor and found that the results were similar by taking comparative measurements with a commercially used spectrophotometer [15]. Wu et al. developed an LED light source spectrophotometer and detected preservatives in foods at a wavelength of 530 nm [16]. Prasanth et al. developed a spectrophotometer to detect the amount of fat in milk and the amount of water added to milk [17]. Isaak et al. developed a low-cost spectrophotometer that can detect nitrogen, phosphorus and potassium in soil using the Raspberry Pi minicomputer [18]. Rivai et al. developed a spectrophotometer that analyzes the amount of protein in milk at a wavelength of 525 nm by using a Raspberry Pi minicomputer. By comparing the spectrophotometer, they developed and a spectrophotometer currently in use with the same samples, they determined that they obtained 2.366% incorrect measurement results [19]. Bocekci et al. designed a hand-held spectrophotometer to distinguish the color tone information of textile fabrics. The spectrophotometer is designed on the Arduino platform and a system that can detect 0-255 different color tones with the new generation color sensor has been realized [20]. Alhamdi et al. proposed a low-cost spectrophotometer device to measure blood glucose levels. The system they developed

works on the FPGA platform and includes 8 LEDs of different wavelengths as a light transmitter and 8 photodiode series as a light detector. In their studies in which they measured the glucose level in the blood, the error was between 0.5% and 2.8% [21]. In [22], the biomedical device is developed to measure COPD parameters. The measured data can be sent to the computer and saved to the SD card and the data is stored in digital environment. The system offers a practical and low cost solution. In another study [23], an Internet of Things (IoT) based system that will allow remote monitoring of measured parameters is developed and data was collected by using Deneyap Card. It is transmitted to different environments and monitored successfully. Bocekci et al. designed and implemented a modular, computer-controlled spectrophotometer operating in the visible region. They concluded that the device is reliable according to repeatability and non-linearity tests. Also, when they compared the device with a commercial similar spectrophotometer, they found that the results matched [24]. Chiu et al. evaluated the uncertainty of transmittance for broadband spectrophotometer. The optimal extended uncertainties of the system were found to be 0.23247 [25]. Rashid et al. proposed a spectrophotometer using LED as a light source for uric acid detection. The proposed system was compared with a system containing a halogen light source. They determined that the sensitivity of the LED light spectrophotometer was 73% higher than that of the halogen lamp. Their findings are that the LED light spectrophotometer can be used to detect uric acid in human urine [26]. Aslan et al. investigated the effect of the drying and settling processes of the ink on the color universe at certain time intervals with the spectrophotometer in the sheet offset printing technique. The values found in their study were tabulated and drying behaviors and ΔE color differences were revealed [27].

The overall aim of the study is to develop a low-cost, small-volume spectrophotometer with a heating system that transmits the measurement results to the cloud. In addition, it aims to include the high technology offered by today's opportunities. Embedded system development options such as microcontroller, Arduino and Raspberry PI were evaluated, and it was decided to use Raspberry PI 3 with the opportunities it provides. The heating system has been developed with on-off logic and Python software language. It is designed to operate at the desired wavelength thanks to the replaceable optical filter and light source. While designing this product, it was aimed to work at the desired temperature and wavelength according to the sample type to be measured.

In order to evaluate, report and back up the results of the product or products analyzed in spectrophotometer usage, an external computer is needed outside the device. Since Raspberry PI 3 is preferred in the realized design, the device can be used as a computer on its own. Thanks to this design, essential working areas in laboratory benches will be provided to the users. In addition to the space advantage, extra computer costs will be avoided. Thanks to portable memory entries and internet connections, it enables users to

transfer their data without the need for additional procedures. With the sample heating feature, which is not available in standard spectrophotometers, it offers users the opportunity to measure at the desired temperature. Thanks to the developed software, the analysis results were transferred to the cloud environment, enabling users to access the analysis results from anywhere they have an internet connection.

2 System model

The product development process is divided into two main parts, software and hardware. These two main sections have been developed separately for heating systems and optical reading systems.

2.1 Heating system

The realized device has a heater system, which is not found in standard spectrometers. With this feature, temperature-related changes in the samples are prevented. The samples were brought to a desired constant temperature value during the measurement and the ambient conditions were stabilized in the measurements. The heating part of the device is divided into two main parts as software and hardware.

In the heater section, a relay that gives commands to the heating device with the signals it receives from the Raspberry PI is used. A 12V 40W ceramic heater, which can be seen in [Figure 1](#), is used as a heating device and is made of ceramic material with a diameter of 6mm and a length of 20mm.



Figure 1. A 12V 40W ceramic heater, with a diameter of 6mm and a length of 20mm

In the design of the heating section, a single channel 5V relay of the Artou brand is used. This relay turns the heater cartridge on or off with the signals it receives from the Raspberry PI. Since Raspberry PI 3 does not have an analog input, DS18B20 is preferred as the temperature sensor shown in [Figure 2](#). The reason for choosing this sensor is that it is low cost and small, as well as having an interrogation time of less than 750 ms and the ability to operate in a wide range such as -55°C to 125°C.



Figure 2. DS18B20 temperature sensor

After the system design was completed, the calibration of the heating system was carried out with a certified external thermometer. The 2490 model of the Almemo brand was used as a certified thermometer. Almemo thermometer is shown in [Figure 3](#).



Figure 3. Almemo 2490 thermometer

The measurements were made for 10 minutes and took 1 data per minute. The device heating section was developed with on-off logic theory.

In this theory, the heater will turn off when it reaches a predetermined temperature and will start to heat again when it drops to a certain temperature. The software will keep the heater cartridge on until the temperature reaches 64.5 °C. When the temperature is in the range of 64.5 °C to 68.85 °C, the software will switch the heater cartridge on for 1 second and 1 second off. The software will turn off the heater cartridge when the temperature exceeds 68.85 °C. This temperature value determined in the software was determined based on user experiences after trial tests and measurements. In the first trials, the rules were; if the temperature is less than 65 °C, turn the heater on, and if the temperature is higher than 65 °C, turn the heater off. However, the heating responses of the heater cartridge caused the measured values to be constantly above 65°C. The software with the developed on-off logic algorithm does not work only at 65°C. The system will act according to any target temperature entered by the user. In the study, 65 °C was determined based on the values used by Avinash Kaur et al. while preparing the sample of Salmonella bacteria [28]. The developed software was developed by targeting this feature. [Figure 4](#) shows heating system algorithm.

2.2 Optical system

In the software part of this study, Raspberry PI 3 minicomputer was programmed with Python software language. Thanks to the user-friendly features of the Python software language, the optical reading software was written in a text document program and then saved as .py and run. Optical reading software opens the light source with the command given by the user and records the data coming from the optical reader at certain time intervals. The recorded data is then evaluated by the user. The data obtained during optical reading can also be followed instantly by the user on the screen. The instantaneous data on the screen allows it to be detected without waiting for the end of the process, if any malfunction has occurred in the sample. The results obtained from the optical reading analyzes are saved in a folder specified in Raspberry Pi 3 in text document format. These

recorded files are transferred to the user's Google drive account with the overGrive program, allowing the user to see the analysis results from any point where they can access the

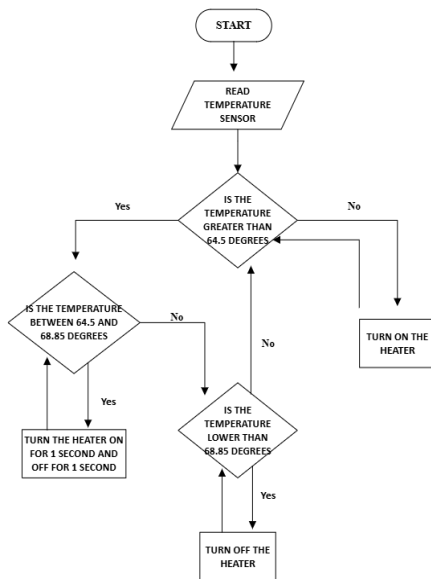
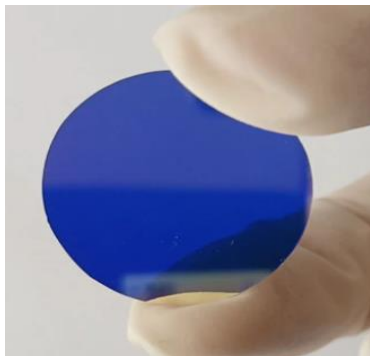


Figure 4. Heating system algorithm

The optical filter and light source seen in Figure 5 are mounted on the optical cover part of the device seen in Figure 6. 470 nm with a diameter of 1 mm Shijiazhuang tangtango optical filter which is produced by Optoelectronic Technology Co. Ltd. is used in the design of the optical measuring part. 1W Power Cob 3.6V 350mA 470nm blue chip LED is used as light source.



470 nm with a diameter of 1 mm Shijiazhuang tangtango optical filter



3.6V 350mA 470nm blue chip LED

Figure 5. Optical filter and LED

This cover design is designed for optical reading at a wavelength of 470 nm in the study. In the future uses of the device, the number of wavelengths that the device can measure can be increased by providing caps with the ability to measure at different wavelengths to be provided to the users. Optical reading software has also been developed to be wavelength independent in accordance with this design.

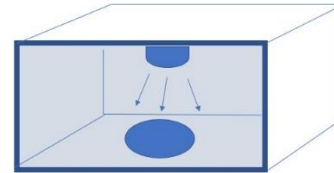


Figure 6. Optical cover

Optical reading part is designed to take measurements with more cost-effective plastic tubes instead of expensive glass cuvettes. In this way, the disposable sample tubes will provide the advantage of reducing the cuvette cleaning time from the measurement preparation times. The design of the optical reading part is accordingly sized to fit the 1.5 ml capped tube. The diameter and location of the hole that the sample tube will enter are designed to be suitable for this sample tube. LDR, which converts the beams coming from the samples into electrical data, was used to make the optical reading of the device. The position of this LDR in the measuring chamber has been determined according to the dimensions of the 1.5 ml tube used. Figure 7 shows optical measuring chamber.

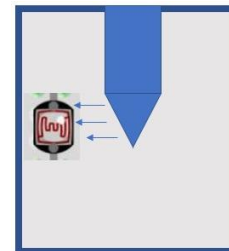


Figure 7. Optical measuring chamber

LDRs are circuit elements whose resistance varies inversely with the intensity of light falling on them. As the amount of light falling on the LDR increases, the resistance value decreases. LDR works with the lowest resistance in the light and the highest resistance in the dark. In the optical reading circuit design with LDR, the problem of giving analog signals from LDR has been encountered. Since there are no analog inputs on Raspberry PI 3, the electrical data sent by the LDR cannot be read. For this reason, an RC circuit is designed to provide optical reading. RC circuits consist of capacitors and resistors. Capacitors are used for charge storage in circuits. The current coming to the capacitor charges the capacitor, causing its voltage to rise. The resistor in this circuit, on the other hand, determines the current flowing to the capacitor, slowing down or accelerating the charging time of the capacitor. In these

circuits, the time the capacitor will fill is determined by the value of the resistor. The LDR resistor will increase or decrease according to the amount of light falling on it. The rate at which the amount of light affects the LDR resistance will determine the charging time of the capacitor. When the capacitor used in the circuit reaches 1.8V, Raspberry PI 3 will detect it as logic 1 level and the time it takes for the GPIO pin to reach the logic 1 level will tell us the light level. In the optical measurement circuit, the charge time of the capacitor is determined by the amount of light falling on the LDR. This amount of light varies depending on the light absorption of the sample. Figure 8 shows optical reading software algorithm.

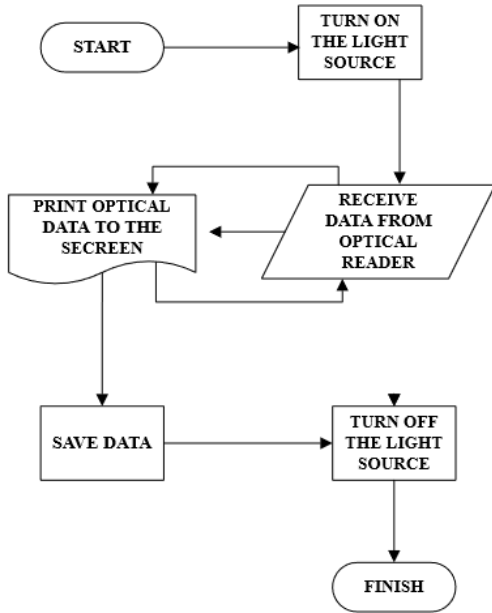


Figure 8. Optical reading software algorithm

2.3 Confidence interval analysis

Confidence interval is a kind of interval estimation for a population parameter in statistics and is an inferential statistical solution tool. Instead of estimating a population parameter value with a single number, there is a range of two (lower and upper limit) numbers that can cover this parameter value. Thus, confidence intervals show how reliable a prediction is.

In our study, a narrow range of 90% was chosen to show the precision of the confidence level measurement. Student's t distribution statistical approach was used to determine the lower and upper values of the confidence interval. The expression giving Student's t distribution is seen in Equation (1).

$$T = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (1)$$

where T is the student t distribution; \bar{x} mean; μ confidence interval; σ standard deviation; n represents the

number of samples.

If 90% is chosen for the confidence interval μ , as shown in Equation (2), the probability for T to be below $-c$ is 5% and for it to be above $+c$ is 5%.

$$\Pr(-c < T < c) = 0.9 \quad (2)$$

where T is the student t distribution; c indicates the lower and upper bounds. From here, the probability of T falling between the lower and upper limits is 90%. The 90% confidence interval expression for μ is seen in Equation (3).

$$\Pr\left(\bar{x} - \frac{c\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + \frac{c\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (3)$$

where \bar{x} mean; μ confidence interval; σ standard deviation; n represents the number of samples. The confidence interval for 90% can be found by Equation (4).

$$|\Delta\mu| = \frac{1,65\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

3 Experiments and results

In this study, a low-cost spectrophotometer has been developed with features suitable for mass production in terms of both hardware and software methodology. The block diagram of the developed system and the circuit diagram are shown in Figure 9.

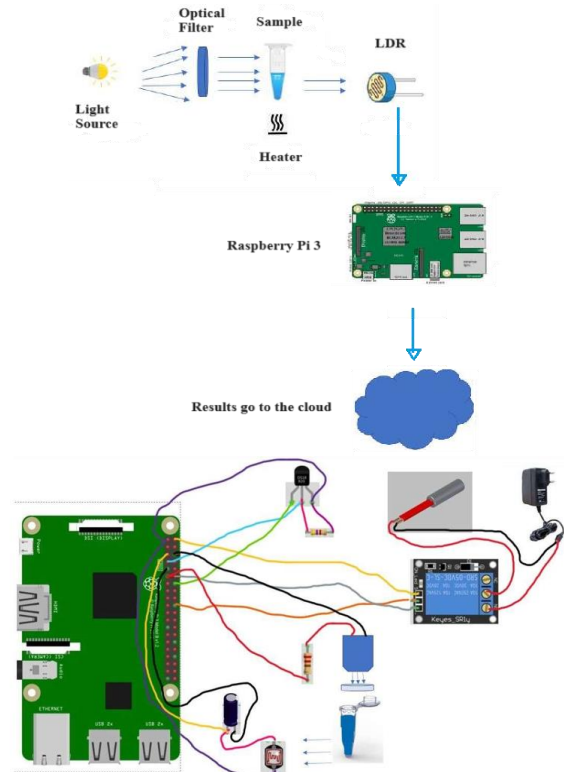


Figure 9. Developed measuring system

The developed device which is shared in Figure 10 has compact dimensions, on/off heating system and transferring the obtained data to cloud systems.

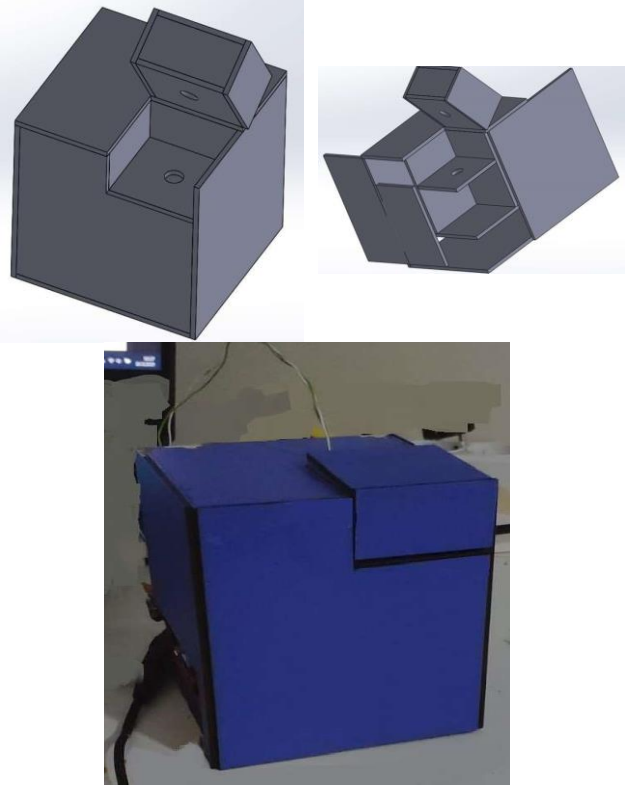


Figure 10. Developed device

During this study, a sample called blue dye, which can absorb light at a wavelength of 470 nm, was tested to model Salmonella bacteria. Protein determinations were made with this dye. Measurements were made with 1.5 ml tubes. 4 different samples were measured. These samples were prepared by dissolving different weights of blue dye in 1 ml of ultrapure water. The samples were prepared as 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2 g in 1 ml of distilled water. Measurements were completed in 3 months, with 100 repetitions. During this period, the samples were stored in the refrigerator at +4 degrees. The measurements were concluded based on the filling time value of the capacitor in the LDR-RC circuit. The filling time value range of the capacitor was determined to be between the result obtained with the light source completely turned off and the results obtained from the 1.5 ml sample tube containing only ultrapure water.

As a result of the measurements, it has been determined that the charging time of the capacitor is proportionally prolonged between ultrapure water, 0.1 g, 0.15 g and 0.2 g. E.g; In the measurement of ultrapure water sample, while the filling time of the capacitor is 202 units on average, this value is on average 223 units in 0.1 g sample, 242 units on average in 0.15 g sample and 255 units on average in 0.2 g sample. In cases where the light source is off, the capacitor gives an average value of 265 units. Figure 11 to 14 show optical measurement results.

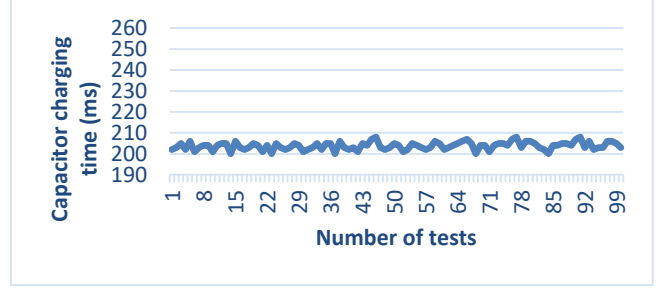


Figure 11. Optical measuring results of pure water

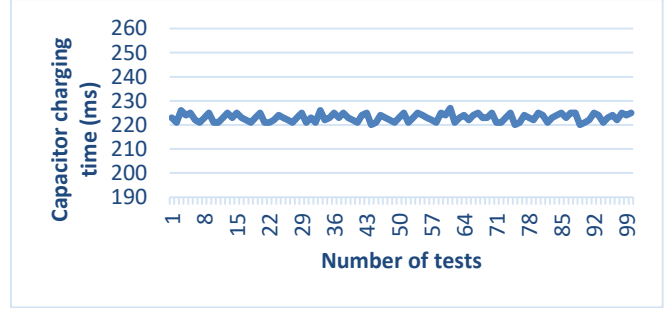


Figure 12. Optical measuring results of 0.1 g sample

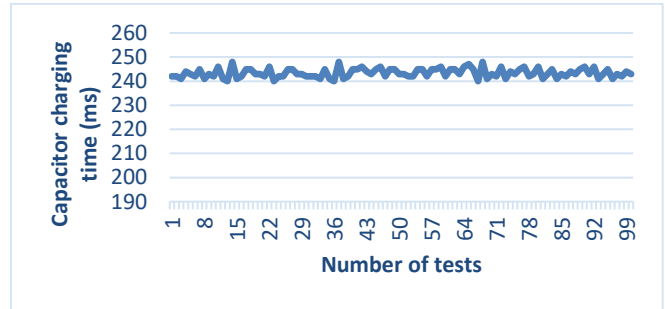


Figure 13. Optical measuring results of 0.15 g sample

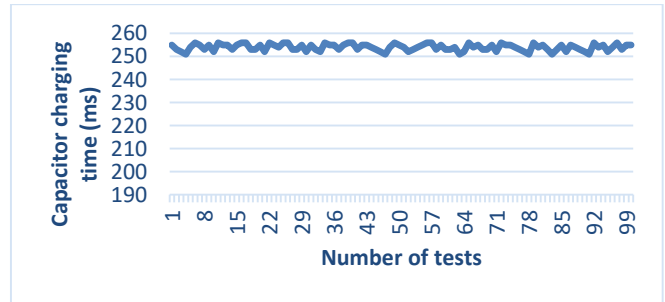


Figure 14. Optical measuring results of 0.2 g sample

Figure 15 shows the regression coefficient for the measured values at 5 different densities. As a result of the tests performed, the R^2 value was determined as 0.9982.

Figure 16 to 20 show the confidence interval analyzes found using measured values (MV) and calculated values (CV) for different densities.

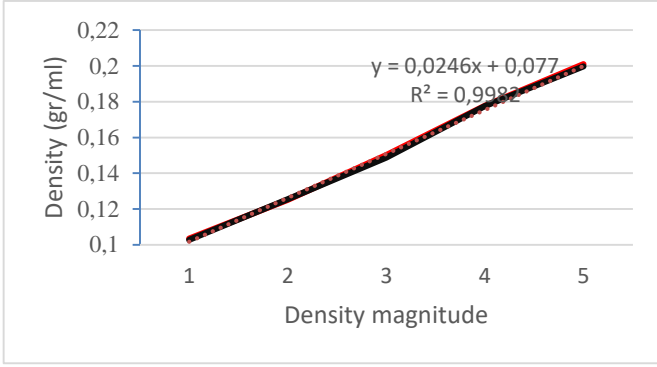


Figure 15. Optical measuring results

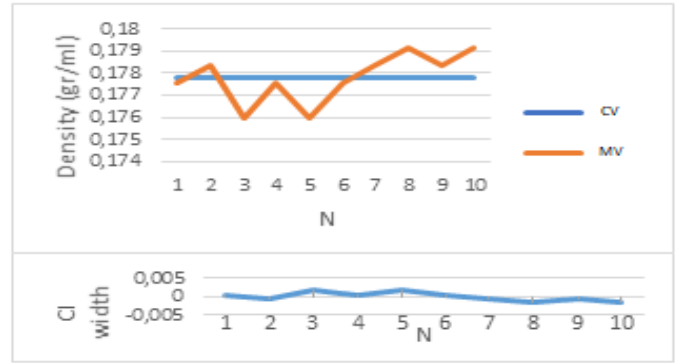


Figure 19. Optical measuring confidence interval results of 0.177 g sample

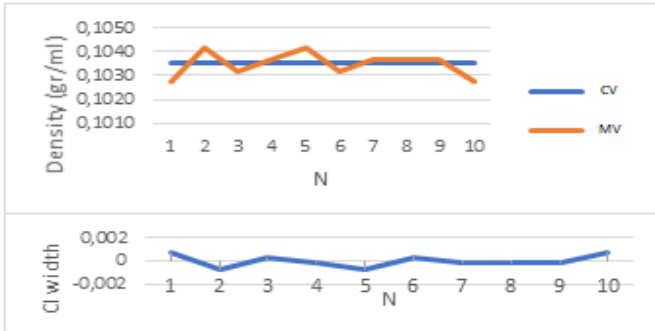


Figure 16. Optical measuring confidence interval results of 0.1 g sample

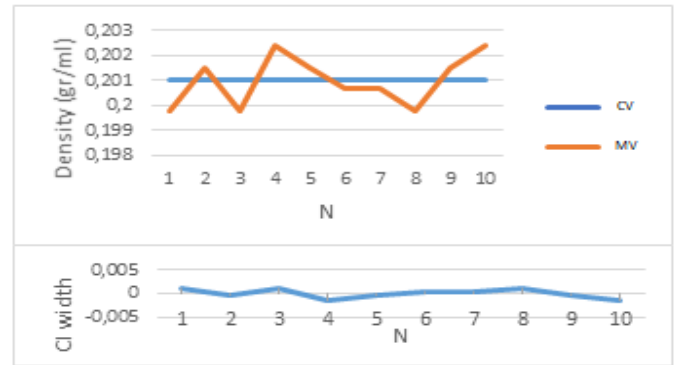


Figure 20. Optical measuring confidence interval results of 0.12 g sample

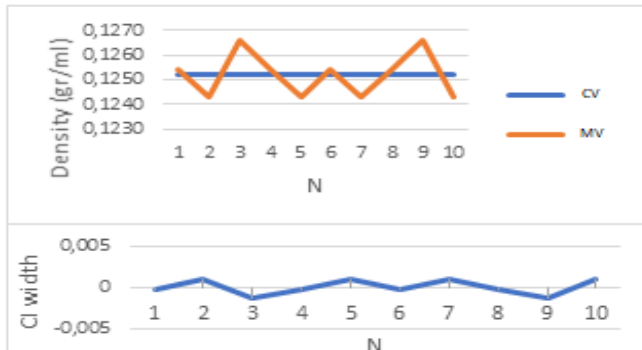


Figure 17. Optical measuring confidence interval results of 0.127 g sample

Confidence intervals of the measurements were calculated using Equation (4). Table 1 shows the results of the confidence intervals.

Table 1. Confidence intervals

Average	Std. Dev.	Conf. Int.
0.1035 g	0.000525799	0.00274454
0.1252 g	0.000911903	0.0047586
0.1502 g	0.001073907	0.00560339
0.1778 g	0.001114205	0.00581365
0.201 g	0.001032974	0.00538981

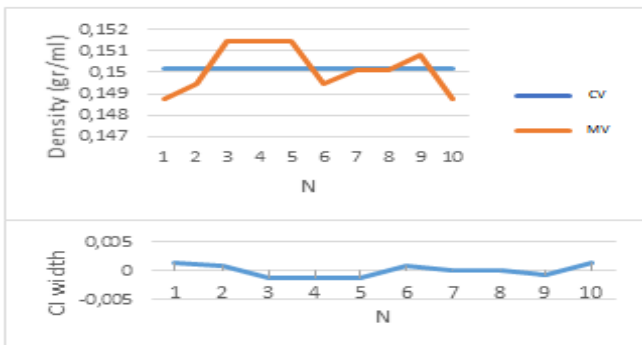


Figure 18. Optical measuring confidence interval results of 0.15 g sample

Table 2 shows the comparison of the proposed system with current studies. All the studies are presented as an alternative to a conventional spectrophotometer, and they are similar in terms of compact dimensions. The spectrophotometer we have designed differs especially in terms of the internal heater unit and the method of transferring the obtained data out of the device.

4 Conclusions

In this study, a low cost and small volume spectrophotometer design has been realized. The developed product stands out in its field with its temperature control feature besides standard spectrophotometers. In the tests performed for 5 different densities, the R² value was

determined as 0.9982. The results obtained in the confidence interval analysis are within $\mp 5\%$ deviation limits. In addition, thanks to the Raspberry PI minicomputer included in it, it prevents the use of an external computer. This allows users to find extra workspace in laboratory areas. The development of software that will process the raw data recorded in this study in the cloud environment can be suggested among the future studies. Apart from this, the spectrophotometer was produced in a specific spectrum range for salmonella bacteria. The operating spectrum can be expanded by developing transmitter and receiver modules on the same device.

Table 2. Comparison of current studies

Author	Lighting	Heather	Access	Application device
[12]	LED	-	-	Arduino Mega
[13]	LED	-	Bluetooth	Arduino Nano
[17]	LED	External	-	Raspberry Pi 3
[28]	LED	Internal	Bluetooth	Arduino Pro Mini
[18]	LED	-	-	Raspberry Pi 3
[21]	LED)/ Conventional	-	-	FPGA
Proposed System	LED	Internal	Internet	Raspberry Pi 3

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 7 %

References

- [1] K. Virkler, I. K. Lednev, Analysis of body fluids for forensic purposes: From laboratory testing to non-destructive rapid confirmatory identification at a crime scene. *Forensic Science International*, 188.1-3 1-17. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.02.013>.
- [2] D. F. Malley, L. Yesmin, D. Wray, and S. Edwards, Application of near-infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 30 (7–8), 999–1012, 2019 <https://doi.org/10.1080/00103629909370263>.
- [3] B. P. Kafle, Chemical Analysis And Material Characterization By Spectrophotometry. Elsevier, 2019. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02426-6>
- [4] X. Zhang, Y. Fang, and Y. Zhao, A portable spectrophotometer for water quality analysis. *Sensors & Transducers*, 148.1, 47, 2013.
- [5] F. C. Hawthorne, Spectroscopic Methods In Mineralogy And Geology. Vol. 18. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2018.
- [6] T. Karaman, E. Altıntaş, T. T. Yildirim, A. Bozoglan, Yaş ve cinsiyete göre maksiller santral diş rengi dağılımının spektrofotometre ile ölçülmesi, *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 28(3), 358-364, 2018. <https://doi.org/10.17567/ataunidfd.473279>.
- [7] Ş. Açıkgöz, Su örneklerinde organik reaktifler ve UV-Vis spektrofotometre kullanarak metal tayini için bir dağıtıcı sıvı-sıvı mikroekstraksiyon (DLLME) yöntemi geliştirme. Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
- [8] E. Şenol, H. Ugur, K. Kaynar, H. Ş. Güven, M. Z. Durak, Farklı yörelerden toplanan geleneksel fermente ürünlerin (turşu suyu, tarhana ve ekşi maya) probiyotik içeriğinin fourier dönüşümlü infrared spektrofotometre (FTIR) ile belirlenmesi. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1 (3), 9-13, 2019.
- [9] O. Olawale, F. A. Oyawale, Characterization of rice husk via atomic absorption spectrophotometer for optimal silica production, *International Journal of Science and Technology*, 2 (4), 210-213, 2012.
- [10] A. Guntarti, M. Ahda, A. Kusbandari, S. W. Prihandoko, Analysis of lard in sausage using Fourier transform infrared spectrophotometer combined with chemometrics. *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, 11 (4), 594, 2019. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_209_19
- [11] K. Mahmoud, S. Park, S. N. Park, S. D. H. Lee, An imaging spectrophotometer for measuring the two-dimensional distribution of spectral reflectance. *Metrologia*, 51 (6), 293, 2014. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/6/S293>
- [12] N. Chaianantakul, K. Wutthi, N. Kamput, N. Pramanpol, P. Janphuang, W. Pummar, R. Phatthanakun, Development of mini spectrophotometer for determination of plasma glucose, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 204, 670-676, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.107>
- [13] K. Laganovska, A. Zolotarjovs, M. Vázquez, K. Mc Donnell, J. Liepins, H. Ben-Yoav, K. Smits, Portable low-cost open-source wireless spectrophotometer for fast and reliable measurements, *HardwareX*, (7), e00108, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00108>
- [14] B. S. Hosker, Demonstrating principles of spectrophotometry by constructing a simple, low-cost, functional spectrophotometer utilizing the light sensor on a smartphone, *Journal of Chemical Education*, 95 (1), 178-181, 2018. <http://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00548>
- [15] S. Taha, G. Rafat, F. Aboshosha, F. R. Mansour, A Simple homemade spectrophotometer. *Journal of Analytical Chemistry*, 72 (2), 239-242, 2017. <https://doi.org/10.1134/S1061934817020113>
- [16] Y. T. Wu, C. E. Yang, C. H. Ko, Y. N. Wang, C. C. Liu, L. M. Fu, Microfluidic detection platform with integrated micro-spectrometer system. *Chemical Engineering Journal*, 393, 124700, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124700>
- [17] P. Prasanth, G. Viswan, K. Bennaceur, Development of a low-cost portable spectrophotometer for milk quality analysis, *Materials Today: Proceedings*, 46, 4863-

- 4868, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.327>
- [18] S. Isaak, Y. Yusof, N.H. Ngajikin, N. Ramli, C.M. Wen, A low-cost spectroscopy with Raspberry Pi for soil macronutrient monitoring. *Telkomnika Telecommunication Computing Electronics and Control*, 17 (4), 1867-1873, 2019. <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v17i4.12775>
- [19] M. Rivai, F. Budiman, Suwito, M. B. Gemintang and H. Pirngadi. Classification of the quality of milk using spectrophotometer system based on Raspberry Pi. 2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, pp. 61-67, 2019. doi: 10.1109/ISITIA.2019.8937267.
- [20] V. G. Böcekçi, K. Yıldız, Hand-held spectrophotometer design for textile fabrics, In AIP Conference Proceedings, 1884 (1), p. 030009. AIP Publishing LLC, 2017. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5002519>
- [21] N. A. Alhamdi, M. J. Aboudiah, Implementation of LED based spectrophotometer using SoC_FPGA, I IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA, pp. 166-170, IEEE, 2021. <http://dx.doi.org/10.1109/MI-STA52233.2021.9464495>
- [22] H. Sümbül, A. H. Yüzer, Design and implementation of a spirometric measurement system that can measure COPD parameters. *Pamukkale Univ. Muh Bilim Derg*, 28 (5), 661-667, 2022. <https://dx.doi.org/10.5505/pajes.2021.23835>
- [23] H. Sümbül, Deneyap kart kullanarak pozisyonel uyku apnesi tespiti ve IOT uygulaması. *GUFBD/GUJS*, 13 (4), 1033-1045, 2023. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1262913>
- [24] V.G. Böcekçi, O. Özyetgin, K. Toker, H. Korkmaz, Personal computer-based visible spectrophotometer design, *Measurement and Control*, 51 (7-8), 311-320, 2018. <https://doi.org/10.1177/0020294018786>
- [25] P. K. Chiu, D. Chiang, W. H. Cho, C. N. Hsiao, C. T. Lee, F. Z. Chen, Transmittance uncertainty evaluation for a broadband spectrophotometer system, *IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, pp. 1304-1308, 2018. doi: 10.1109/ICASI.2018.8394532.
- [26] N. C. Abd Rashid, N. H. Ngajikin, A. I. Azmi, R. Arsat, S. Isaak, N. A. Cholan, N. E. Azmi, Spectrophotometer with enhanced sensitivity for uric acid detection, *Chinese Optics Letters*, 17 (8), 081701, 2019. <http://dx.doi.org/10.3788/COL201917.081701>
- [27] B. Aslan, Z. Özomay, E. Köse, Ofset Baskıda Mürekkebin Kuruma Sürecinde Renk Değişimlerinin Tespit Edilmesi, *Politeknik Dergisi*, 13 (2), 151-158, 2010.
- [28] A. Kaur, A. Ruhela, P. Sharma, H. Khariwal, S. Seth, A. Kumar, D. Kalyanasundaram, Simultaneous and high sensitive detection of Salmonella typhi and Salmonella paratyphi a in human clinical blood samples using an affordable and portable device, *Biomedical Microdevices*, 21 (4), 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10544-019-0441-6>





PPK yöntemi ile İHA verilerinden üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin konumsal doğruluğunun araştırılması: Antarktika'daki Horseshoe Adası örneği

Investigation of the positional accuracy of orthophoto and DEM Products generated from UAV data with the PPK method: A case study of Horseshoe Island, Antarctica

Esra Günaydın^{1,*}, Mahmut Oğuz Selbesoğlu², Mustafa Fahri Karabulut³, Oleg Vassilev⁴, Burak Akpınar⁵, Mustafa Yanalak⁶, Özgün Oktar⁷, Burcu Özsoy⁸

^{1,2,6} İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

³ Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

⁴ Bulgar Antarktika Enstitüsü, 1504, Sofya, Bulgaristan

⁵ Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

^{7,8} TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Kutup Araştırmaları Enstitüsü, 41470, Kocaeli, Türkiye

⁸ İstanbul Teknik Üniversitesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü, 34940, İstanbul, Türkiye

Öz

Küresel iklim değişikliği süreçlerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve insanlığın gelecekteki süreçlere uyum sağlayabilmesi açısından buzul alanlardaki değişikliklerin izlenmesi önem taşımaktadır. Buzul değişimlerinin takibi için kullanılan yöntemlerden birisi olan insansız hava aracı (İHA) fotogrametrisi ile kriyosferin ve buzul değişikliklerinin yüksek konumsal doğrulukla izlenebilmesi için küresel konum belirleme sistemlerine (Global Navigation Satellite System-GNSS) dayanan konum belirleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Antarktika'da, Türk Bilimsel Araştırma Kampı'na ev sahipliği yapan Horseshoe Adası'nda, buzul takibi amacıyla belirlenen bir test alanında kinematik ölçme sonrası değerlendirme (Post Processing Kinematic-PPK) yöntemi kullanılarak üretilen fotogrametrik ürünlerin konumsal doğruluğu araştırılmıştır. Hava fotoğraflarından hareket ile nesne oluşturma (Structure from Motion-SfM) yöntemine dayanarak üretilen ortofoto ve sayısal yükseklik modelinin (SYM) konum doğruluğu, arazide klasik gerçek zamanlı kinematik (Real Time Kinematic-RTK) konum belirleme yöntemiyle konumları belirlenmiş yer kontrol noktaları kullanılarak elde edilmiştir. Yatay ve düşey koordinatlar için hesaplanan karesel ortalama hata değerleri sırasıyla 1.05 cm, 0.52 cm ve 11.33 cm'dir.

Anahtar kelimeler: Antarktika, İHA, PPK, Ortofoto, SYM

1 Giriş

Küresel iklim sistemlerini etkileyen temel bileşen olan güneş radyasyonu, Dünya'nın farklı enlemlerinde sıcaklık farklılıklarına sebep olmaktadır. Bir yılda kutuplara göre beş kat daha fazla radyasyon alan ekvator bölgesinden kutup bölgelerine atmosfer ve okyanuslar aracılığıyla ısı akışı gerçekleşmektedir [1]. Küresel iklim değişikliğinin dünya genelinde sıcaklık dağılımını etkilemesiyle kutup

Abstract

Monitoring changes in glacial areas is important for a better understanding of global climate change processes and adaptation of humanity to future processes. Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, one of the methods used to monitor glacier changes, uses positioning methods based on global navigation satellite systems (GNSS) to monitor cryosphere and glacier changes with high positional accuracy. In this study, the positional accuracy of photogrammetric products generated using the Post Processing Kinematic (PPK) method was investigated in a test area designated for glacier monitoring on Horseshoe Island, which hosts the Turkish Scientific Research Camp in Antarctica. The positional accuracy of the orthophoto and digital elevation model (DEM) generated based on the Structure from Motion (SfM) method using aerial photographs was determined with ground control points whose positions were determined using the classical real-time kinematic positioning (RTK) method in the field. The root mean square error values calculated for horizontal and vertical coordinates are 1.05 cm, 0.52 cm, and 11.33 cm, respectively.

Keywords: Antarctica, UAV, PPK, Orthophoto, DEM

bölgelerinde daha hızlı bir ısınma yaşanması buzulların erimesini tetiklemektedir. Aynı zamanda atmosferik dolaşım sistemlerini ve deniz akıntılarını etkileyen bu durum Dünya genelinde ısı transferinde dengesizliklere yol açabilmektedir. Kutup bölgeleri gezegenimizdeki bir çok bölgeyle karşılaştırıldığında, küresel iklim değişikliği etkilerinin çok daha hızlı bir şekilde gözlemlendiği bölgelerdir [2]. Bilim insanları tarafından dünyanın doğal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esgunaydin@itu.edu.tr (E. Günaydın)

Geliş / Received: 17.06.2024 Kabul / Accepted: 02.10.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1500951

laboratuvarı olarak adlandırılan ve büyük bölümü buz tabakası ile kaplı olan Antarktika Kıtası'nda artan sıcaklıklar; okyanus asitlenmesi, buz tabakalarının incilmesi ve bu etkilerin sonucunda da deniz seviyesinin yükselmesi risklerini beraberinde getirmektedir. Güney Okyanusu, Atlantik, Pasifik ve Hint Okyanusları arasında bağlantı görevi gören Antarktika'da iklim değişikliği araştırmaları yapılması küresel iklim sisteminin geleceğini tahmin etmek, küresel iklim ve ekolojik sistemler için kritik öneme sahiptir [3]. Bu etkileri daha iyi anlamak ve gelecek yüzyıl için daha iyi projeksiyonlar üretebilmek için atmosfer, okyanus ve kriyosfer ilişkilerini görebileceğimiz modellere ihtiyaç duyulmaktadır [4]. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda kullanılan uzaktan algılama yöntemleri geniş kapsama alanı ve küresel ölçekte devamlı izleyebilme yeteneklerine sahiptir. Ancak uzaktan algılamada uydu sistemleri buzul alanları izlemede hava koşulları, görüntü kalitesi ve maliyet ile ilgili çeşitli kısıtlamalarla karşı karşıya kalabilmektedir [5, 6]. Antarktika ve çevresindeki küçük adalarda gerçekleştirilecek izleme çalışmalarında ihtiyaç duyulan yüksek çözünürlükte veriler için bölgesel ölçekte çalışmalara gereksinim duyulmaktadır [7].

Son yıllarda dinamik yapıdaki buzulların yüzey topoğrafyasını inceleme, morfolojik özelliklerindeki varyasyonları izleme ve topoğrafyayı haritalama gibi çalışmalarda yüksek mekansal çözünürlüklü görüntüler sağlayabilen insansız hava aracı (İHA) destekli sistemlerin uydu sistemlerine bir alternatif ya da destekleyici araç olarak kullanıldığı görülmektedir [8]. 2006 ve 2021 yılları arasında Antarktika Kıtası'nda İHA teknolojisi kullanılarak yapılan bilimsel araştırmalar sonucunda yazılan makale sayısına bakıldığında, özellikle 2019 yılından büyük bir artış olduğu görülmüştür [9]. Antarktika'nın florasına ait özelliklerin araştırılması, yeryüzü şekillerinin haritalandırılması, kar kalınlığı ve alansal değişimlerinin izlenmesi gibi çalışmalarda İHA fotogrametrisi yönteminin kullanıldığı görülmektedir [7, 8, 10, 11]. Bu yöntemle üretilen ortofoto ve sayısal yükseklik modeli (SYM) ürünleri çeşitli disiplinler için temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Buzul bölgelerde yapılan değişim analizlerinin birçoğu için üretilen fotogrametrik ürünlerin mekansal çözünürlüğü ve konum doğruluğu oldukça önemlidir. Konum belirleme yöntemleri açısından incelendiğinde, uçuş bölgesinde yer kontrol noktası tesis edilmesine gereksinim duyulmadan kullanılacak küresel konum belirleme sistemlerine (Global Navigation Satellite Systems-GNSS) dayanan ölçme yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden biri İHA'nın sahip olduğu GNSS alıcısının, bir radyo bağlantısı üzerinden referans istasyonu ile gerçek zamanlı iletişim kurarak eş zamanlı düzeltmeler gerçekleştirilen gerçek zamanlı kinematik (Real Time Kinematic-RTK) yöntemidir [12]. Bu yöntemle İHA sisteminin gerçek zamanlı olarak konumu santimetre düzeyinde belirlenebilmektedir [13]. Bunun yanında İHA üzerindeki GNSS alıcısının veri kaydetme özelliğine sahip olması, kinematik ölçme sonrası değerlendirme (Post Processing Kinematic-PPK) çözümü yapılmasına olanak sağlamaktadır. Çekim sırasında kameranın konum verilerinin düzeltilmesi işlemi PPK ile

ölçme sonrası değerlendirme adımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem özellikle ulaşılması zor alanlarda zaman ve risk faktörleri açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır [14].

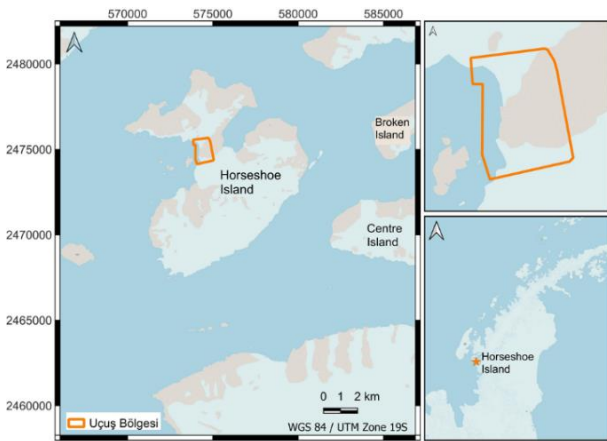
Antarktika ve benzer özelliklere sahip buzul bölgeler içeren alanlarda ise, çeşitli amaçlarla İHA fotogrametrisi yöntemi kullanılmışken, PPK yöntemi kullanılarak üretilen fotogrametrik ürünlerin konumsal doğruluğunu irdeleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Doğu Antarktika'da farklı test alanlarında buzul yüzeyinde ve hareketindeki değişiklikleri tespit etmek için İHA fotogrametrisinin kullanıldığı bir çalışmada, PPK ile doğrudan coğrafi referanslama yöntemi kullanılarak yüksek mekansal çözünürlükte sayısal yükseklik modelleri üretilmiştir. Konumsal doğruluk güvenlik problemleri nedeniyle sadece belirli bölgelere yer kontrol noktaları (YKN)'ler tesis edilerek araştırılrsa da buzul hareketlerinden dolayı doğruluk değerlendirmesinde kullanılamayacağı görülmüştür. Kabaca bir doğruluk değerlendirmesi yapılabilmesi adına hava triyagülasyonunun doğruluğuna ilişkin değerler sunulmuştur. Farklı çalışma bölgeleri için hesaplanan standart sapma değerleri yatay koordinat bileşeni için 3-190 cm ve düşey koordinat bileşeni için ise 3-80 cm arasında değişmektedir [15]. Batı Grönland'daki Store Buzulu'nda gerçekleştirilen bir diğer çalışma, çevresel ve lojistik açısından yer kontrol noktalarının tesis edilmesinin güç olduğu bölgelerde, GNSS destekli hava triyagülasyonunun avantajlarını sunmayı ve buzul dinamiği çalışmaları için bu yöntemi doğrulamayı amaçlamıştır. Çalışmada PPK yönteminin tercih edilmesinin sebebi, gerçek zamanlı radyo bağlantısına ihtiyaç duyulmadan hassas sonuçlar elde edilebileceği şeklinde açıklanmıştır. Yaklaşık 450 m yükseklikte bir buzul ortamında SfM (Structure from Motion-hareket ile nesne oluşturma) fotogrametrisi ile üretilen ürünlerinin yatay ve düşey koordinatlar için doğruluk değerleri sırasıyla ± 12 cm; ± 14 cm olarak sunulmuştur [16]. Forni Buzulu'nda (İtalyan Alpleri) gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise, DJI marka Phantom 4 RTK hava aracı kullanılarak 2022 yılı ağustos ortasında buzul bölgenin mevcut durumu araştırılmıştır. PPK ve SfM fotogrametrisinin entegrasyonu ile buzul yüzey morfolojisini tanımlamak için üretilen fotogrametrik ürünlerin, gelecekte morfolojik değişimler ve hacimsel farkların ortaya konulabilmesi için yapılacak çalışmalara referans olması amaçlanmıştır. Üretilen ortofoto ve SYM için yer örnekleme aralığı (YÖA) sırasıyla 3 cm ve 20 cm olarak belirlenmiştir; 2B ve 3B konumsal doğruluklarını ifade eden RMSE değerleri ise sırasıyla 4 cm ve 5 cm olduğu belirtilmiştir [17]. Antarktika'da Larsemann Tepeleri'nde gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise doğrudan coğrafi referanslama yöntemleri değerlendirilmiştir. Yer kontrol noktalarının tesis edilemeyeceği bölgeler için bu yöntemlerin performansını değerlendiren çalışmada, aralarında PPK yönteminin de bulunduğu üç farklı yöntem ile üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin 3.48-3.91 cm ($\sim 0.7xYÖA$) yatay ve 14.23-15.88 cm ($\sim 2.6xYÖA$) arasında düşey doğruluk değerlerine sahip olduğu görülmüştür [18].

Buzul alanlarında İHA fotogrametrisi yönteminin kullanıldığı çeşitli çalışmalar mevcut olsa da özellikle Antarktika'da PPK yönteminin test edildiği çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, Antarktika'nın Türk bilimsel araştırmalarına ev sahipliği yapan Horseshoe Adası'nda belirlenen bir test alanında, zorlu çevresel koşullarda İHA fotogrametrisi kullanılarak yüksek mekansal çözünürlükte ve konumsal doğrulukta fotogrametrik ürünlerin elde edilmesine odaklanmaktadır. Özellikle ani yükseklik değişimlerinin ve derin buzul yarıklarının bulunduğu çalışma bölgemizde, İHA ile elde edilen hava fotoğraflarının PPK yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin konum doğruluğu incelenmiştir.

2 Çalışma alanı

Antarktika iklim koşulları açısından soğuk hava, şiddetli rüzgarlar ve kuraklık özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Özellikle iç kesimlerinde hakim olan aşırı soğuk, havanın kurumasına yol açarken, yerçekimi kaynaklı güçlü rüzgarların oluşumuna da sebep olmaktadır [19]. Bölgede milyonlarca yıl boyunca biriken buzlar yaklaşık 4.8 km derinliğe kadar ulaşabilmektedir. Kıtanın yaklaşık olarak 13,7 milyon kilometrekarelik alanı (yaklaşık %97,6'sı) kar ve buzul alanlardan oluşmaktadır [20]. Bölgedeki kar ve buz tabakaları, güneş ışığını büyük ölçüde yansıtarak yüksek albedo oluşturur; bu durum ise sensörlerin algılamasında yanılsamalara yol açarak görüntülerde istenmeyen unsurların ortaya çıkmasına neden olabilir [21].

İHA ile uçuş görevlerinin gerçekleştirildiği test alanının bulunduğu Horseshoe Adası, Antarktika Yarımadası'nın batısında yer alan bir adadır. Adanın toplam yüzey alanı yaklaşık 60 km² olup, bunun %66'sı kar/buzul alanlarla kaplıdır [22]. Türk Bilimsel Araştırma İstasyonunun yer aldığı adada belirlenen test alanı (yaklaşık -67.8301° enlem ve -67.2376° boylam) yaklaşık olarak 1.4 km²'lik bölgeyi kapsamaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Horseshoe Adası'nda insansız hava aracı ile uçuş gerçekleştirilen bölge, Antarktika

İnsansız hava aracı ile uçuş yapılacak bölge seçilirken, vahşi yaşamın rahatsız edilmemesi ve olumsuz çevresel etkilerin gerçekleşmemesi için güvenli ve istasyona yakın bir alan olmasına özen gösterilmiştir.

3 Yöntem

3.1 İnsansız hava aracı fotogrametrisi

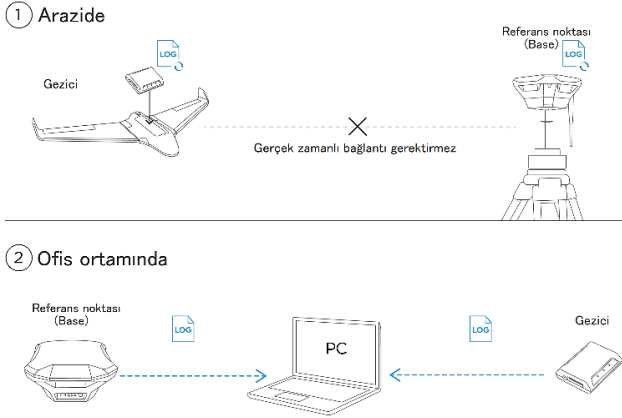
İHA fotogrametrisi, erişilmesi zor ortamlarda veri toplayabilen, kullanımı kolay ve otonom veya manuel olarak kullanılabilen İHA'lar ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem, yüksek mekansal çözünürlüğe sahip kameralarla çekilen fotoğrafların fotogrametrik işleme tabi tutulmasıyla, yüksek mekansal çözünürlükte ortofoto ve üç boyutlu sayısal yüzey modelleri elde edilmesini sağlar. Son yıllarda bilgisayar işlem gücü performanslarının artmasıyla birlikte şirketler güçlü yazılım platformları geliştirmiştir. Bu gelişmeler, araştırmacıların İHA fotogrametrisiyle 3B model üretme çalışmalarına olan ilgilerini önemli ölçüde artırmıştır [23]. İHA fotogrametrisinde birçok yazılım platformunda kullanılan SfM tekniği, farklı noktalardan çekilen ve yüksek düzeyde örtüşen iki boyutlu (2B) hava fotoğraflarından benzer kilit noktaları otomatik olarak bularak üç boyutlu (3B) veri elde edilmesine temel oluşturan görüntü eşleme algoritmasıdır [24].

İHA sistemleri ile hava fotoğrafları elde edilmesinde genel prosedür sırasıyla; uçuş parametrelerinin belirlenmesi, uçuş planının hazırlanması, uçuş görevinin tamamlanması ve verilerin kalite kontrolünün gerçekleştirilmesi şeklindedir. Hava fotoğraflarının elde edilmesinden sonraki fotogrametrik süreç ise; genel olarak; hava triyngülasyonu, iç ve dış yönelme parametrelerinin belirlenmesi (kamera parametrelerinin tanımlanması ve yer kontrol noktaları ölçmeleri), 2B fotoğraflardan 3B geometrinin oluşturulmasına yönelik model tanımlanması, yüzey modelleri ve ortofoto ürünlerinin oluşturulması aşamalarından oluşmaktadır [25].

3.2 Kinematik ölçme sonrası değerlendirme

Uçuş görevinin gerçekleştirileceği bölgede YKN tesis edilmesine gereksinim duyulmadan kullanılacak farklı GNSS ölçme yöntemleri mevcuttur. Başlıca kullanılacak yöntemlerden Diferansiyel GNSS (DGNSS) ve RTK, en az biri referans ve biri gezici olmak üzere birden fazla alıcının kullanıldığı konum belirleme teknikleridir. Referans ve gezici arasında radyo frekansı ya da internet gibi kablosuz iletişim kanalı gerektirmektedir. DGNSS konumlandırma tekniği kod ölçülerini kullanmaktadır ve bu nedenle desimetre mertebesinde daha yüksek konum doğruluğu gerektiren uygulamalarda taşıyıcı faz ölçmelerine dayanan RTK yöntemi ön plana çıkmaktadır. Ancak bazı uygulamalarda gezicinin referans istasyonuna olan mesafesi ve zayıf internet bağlantısı RTK performansını etkileyebilmektedir [26].

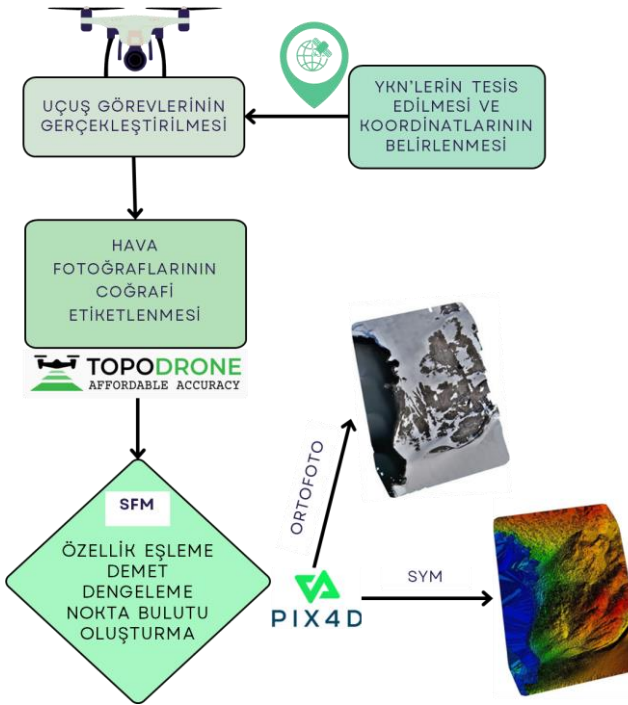
Bir diğer alternatif olan PPK yöntemiyle uçuş esnasında İHA'da mevcut GNSS alıcısı tarafından toplanan ham GNSS verileri, uçuş esnasında sürekli gözlem yapmaktan olan sabit referans istasyonu verilerine dayanarak işlenmektedir. Bu yöntem taşıyıcı faz ölçmelerine dayanmaktadır ve santimetre mertebesinde konum doğruluğu sağlamaktadır [27]. Hassas konumlandırma gerçek zamanlı olarak gerçekleşmemektedir. Hem İHA'ya hem de referans istasyonuna ait GNSS gözlem verileri daha sonra ofis ortamında değerlendirilir (Şekil 2).



Şekil 2. PPK yöntemi işleyişi [28]

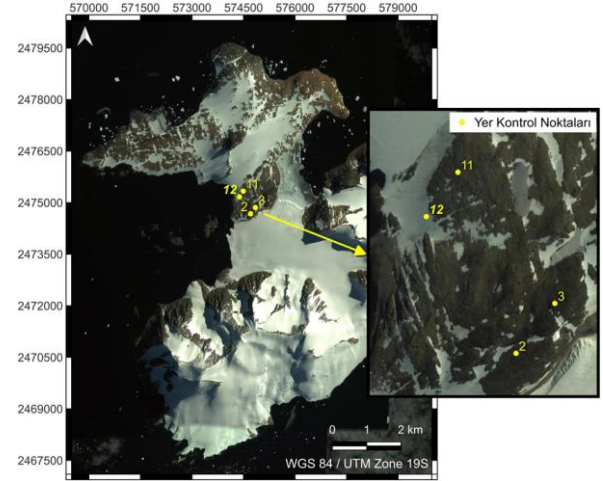
4 İş akışı

Çalışma İHA fotogrametrisi yöntemiyle yüksek mekansal çözünürlükte ortofoto ve SYM üretilmesi ve PPK yönteminin konumsal doğruluğunun araştırılması üzerine odaklanmaktadır. Genel işlem adımları Şekil 3'de gösterilmektedir. Öncelikle PPK yönteminin doğruluğunu kıyaslayabilmek için uçuş planı hazırlanacak bölgede yer kontrol noktalarının tesis edilmesi planlanmıştır.



Şekil 3. İHA fotogrametrisi yöntemiyle ortofoto ve SYM üretilmesine ait iş akış diyagramı

Bu doğrultuda uçuş planı hazırlanacak bölgeye dağılmış 4 adet yer kontrol noktasının yerleri arazide belirlenmiştir (Şekil 4). Yer seçimi sırasında nokta tesisi yapılabilecek sağlam nitelikte zeminler olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4. YKN'lerin uçuş bölgesindeki dağılımı

Önceden hazırlanmış 30cmx30cm kare lamine işaretçiler M8 paslanmaz çelik dübel ve civata ile belirlenen yerlere sıkıca sabitlenmiştir. Emlid firmasına ait Reach RS2 GNSS alıcısı kullanılarak her noktanın konumu RTK yöntemiyle belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Uçuş bölgesinde yer kontrol noktalarının işaretçilerinin yerleştirilmesi ve RTK ölçmeleri

Çalışma bölgesinde ani yükseklik değişimleri ve keskin kayalar, arazide sık ve homojen bir şekilde YKN'lerin tesis edilmesini zorlaştıran unsurlardır. Sefer sırasında hava koşullarının elverişliliği ve zamansal kısıtlamalar dikkate alınarak; kolaylıkla erişilebilir, farklı yüksekliklerde ve genel olarak homojen bir dağılım gösterecek şekilde konumları belirlenmiştir. Ayrıca, ani kar yağışlarının YKN işaretçilerini kapatma riski göz önünde bulundurularak, noktaların en hızlı ve en uygun şartlarda tesis edilmesine özen gösterilmiştir. YKN'lerin koordinat bilgileri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. YKN'lerin coğrafi koordinatları

Nokta Numarası	Enlem	Boylam	Elipsoidal Yük.(m)
2	67.8330°S	67.2256°W	107.526
3	67.8314°S	67.2224°W	134.143
11	67.8272°S	67.2311°W	89.193
12	67.8287°S	67.2337°W	56.347

Çalışmada uçuş görevlerini gerçekleştirmek üzere uçuş planı, İHA'nın kalkacağı noktadan 90 m sabit uçuş yüksekliğinde; ileri ve yan örtü oranları %80 ve %75 olacak şekilde düzenlenmiştir. Uçuş görevlerinin gerçekleştirildiği DJI Marka Phantom 4 Pro hava aracı ile ilgili temel özellikler Tablo 2'de sunulmuştur.

Uçuşlar gerçekleştirilirken, eş zamanlı olarak referans istasyonunda 5 saat boyunca GNSS uydu gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Tüm uçuş görevinin tamamlanması için 6 batarya kullanılmış olup sonuç olarak 2257 adet görüntü verisi elde edilmiştir. Görüntü verilerinin tamamı 18.36 GB dosya boyutuna sahiptir. Fotoğraf merkezi koordinatları yaklaşık koordinatlar olan görüntü verileri TOPODRONE PPK Post Processing yazılımının demo versiyonu kullanılarak ofis ortamında işlenmiştir. Sırasıyla İHA'nın GNSS alıcısı tarafından toplanan gözlem dosyası ve ham görüntü verileri, İHA model bilgisi ve anten sapma değerleri, referans istasyonunda toplanan GNSS gözlem dosyası ve referans istasyonunun hassas koordinat bilgileri yazılıma girdi olarak verilmiş olup, fotoğraf merkezi koordinatları yeniden hesaplanmış görüntüler çıktı olarak alınmıştır. Pix4Dmapper yazılımının 4.8.4 versiyonu kullanılarak görüntülerin kalibrasyonu, örtüşen görüntülerden bağlama noktalarının otomatik olarak bulunması, konum doğruluğu araştırılmak üzere YKN'lerin

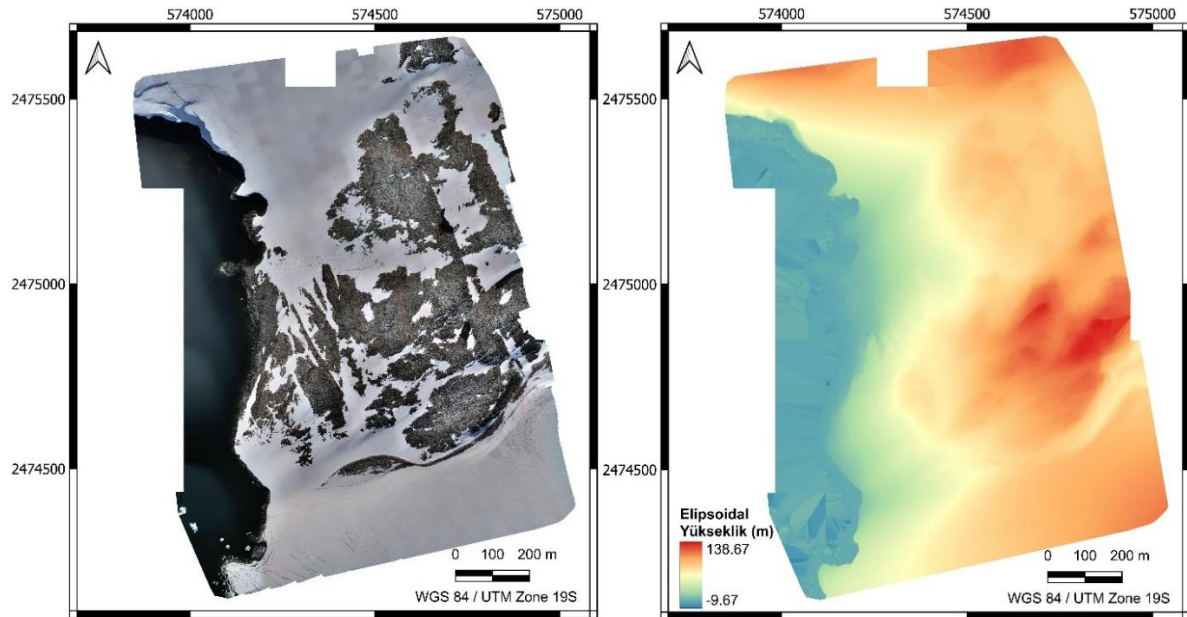
görüntülerde işaretlenmesi, yoğun nokta bulutu, ortofoto ve SYM ürünlerinin üretilmesi aşamaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında YKN'lerden üçü (3, 11 ve 12 numaralı noktalar) rektifikasyon amaçlı biri (2 numaralı nokta) kontrol amaçlı kullanılarak tekrarlanmış ve fotogrametrik ürünler ikinci bir yöntemle de elde edilmiştir. Çıktı verilerin koordinat sistemi WGS 84/UTM 19S olarak tanımlanmıştır.

5 Bulgular

Test alanında 14 Şubat 2022 tarihinde İHA uçuş görevleri tamamlanması ardından elde edilen 2257 adet görüntünün, fotogrametrik değerlendirilmeyle üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin (Şekil 6) ortalama yer örnekleme aralığı 2.74 cm'dir (Tablo 3). Her iki yöntemle üretilen fotogrametrik ürünlerde de görüntülerin yaklaşık %96'sı kalibre edilmiş, görüntü başına ortalama 4041 anahtar nokta bulunmuş ve kalibre edilmiş görüntü başına ortalama 1120 eşleme gerçekleşmiştir. PPK işlemi ile konumları hesaplanan YKN'lerin klasik RTK yöntemiyle konumları belirlenmiş YKN'ler ile kıyaslanmıştır. Bu amaçla 3B yatay (X, Y) ve dikey (Z) koordinatları için hesaplanan karesel ortalama hata (RMSE) değerleri sırasıyla 1.05 cm, 0.52 cm ve 11.33 cm'dir.

Tablo 2. Phantom 4 Pro hava aracı teknik özellikler [29]

Ağırlık (Pil ve pervaneler dahil)	Maksimum Rüzgar Hızı Direnci	Maksimum Uçuş Süresi	Çalışma Sıcaklık Aralığı	Kamera Sensörü	Kamera Lensi	Pil Kapasitesi
1388 gr	10 m/s	Yaklaşık 30 dk	32°-104°F (0°- 40°C)	1'' CMOS Etkin pikseller: 20M	FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm biçim eşdeğeri) f/2.8 - f/11 otomatik odaklama 1 m - ∞	5870 mAh



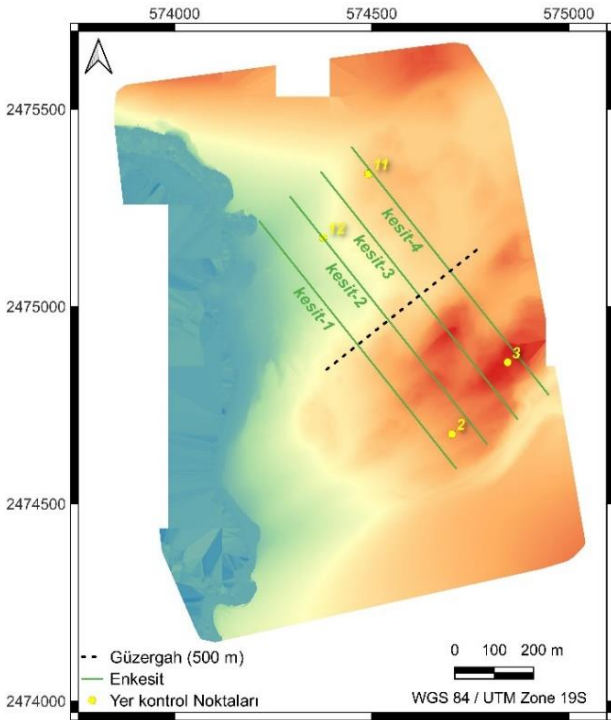
Şekil 6. İHA fotogrametrisi ile üretilen ortofoto ve SYM

Benzer bir hesaplama mevcut YKN'lerden üçü rektifikasyon amaçlı kullanılarak üretilen ürünler için de yapılmış olup; 3B yatay (X, Y) ve düşey (Z) koordinatları için sırasıyla 0.22 cm, 0.85 cm ve 5.77 cm olarak bulunmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. PPK ve YKN ile rektifikasyon yöntemlerinin konum doğruluğunun karşılaştırılması

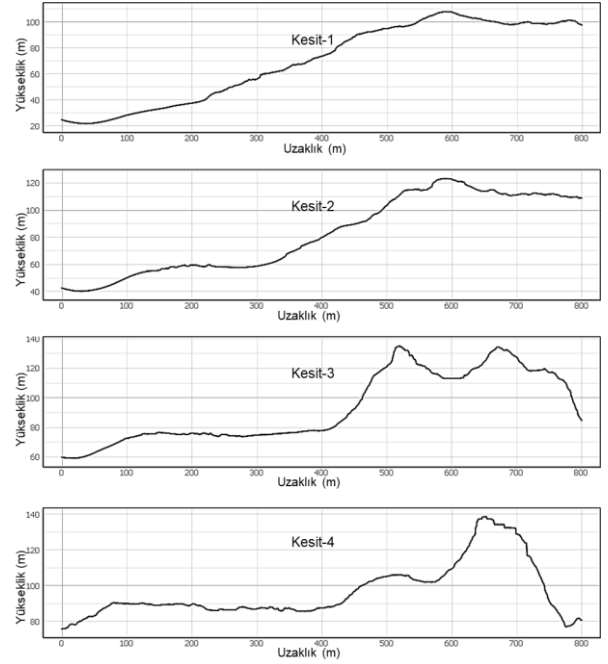
Yöntem	YÖA (cm)	Coğrafi referanslama	RMSE (cm) [X, Y, Z]
PPK	2.74	4 adet KN	1.05, 0.52, 11.33
YKN ile rektifikasyon	2.74	1 adet KN 3 adet YKN	0.22, 0.85, 5.77

Üretilen SYM üzerinde belirlenen 500 m uzunluğundaki güzergâh boyunca her 100 m'de bir enkesitler alınmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. SYM'den alınan kesitlerin güzergahları

Alınan bu enkesitler üzerinde yükseklik değerlerini gösteren grafikler Şekil 8'de sunulmuştur. Bu grafiklerin, özellikle YKN'lerin bulunduğu bölgelerdeki yükseklik değişimlerini daha iyi anlamak adına önemli olduğu düşünülmektedir. 800 m uzunluğa sahip enkesitlerin profilleri her bir kesitin en kuzeydeki başlangıç noktasından en güneydeki bitiş noktasına doğru olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 8. SYM'den alınan kesitlere ait grafikler

6 Sonuçlar

Küresel iklim değişikliği etkilerinin gözle görülür derecede olduğu kutup bölgelerinde yapılan bilimsel araştırmalar için İHA teknolojileri oldukça kullanışlıdır. Yüksek mekansal çözünürlük ve kolaylıkla tekrarlanabilirlik özellikleriyle kar ve buzul alanların morfolojilerini ve dinamiklerini izleme çalışmalarında kullanılabilmektedir. Yüksek mekansal çözünürlüğe sahip görüntülerden üretilen fotogrametrik ürünler analiz edilerek, kıyı alanlardaki değişiklikler, kar ve buzul alanlarda alansal ve hacimsel değişiklikler analiz edilebilir. Ancak bu bölgelerde çoğu zaman zorlu çevresel koşullar ve zamansal kısıtlamalar nedeniyle yer kontrol noktası tesis edilmesi önemli bir zorluktur. Bu noktada doğrudan coğrafi referanslama yöntemlerinin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Dünya'da orta enlemlerde yapılan birçok çalışma İHA fotogrametrisinde RTK ve PPK yöntemlerinin konumsal doğruluğunu sunmaktadır. Ancak Antarktika'da özellikle PPK yönteminin kullanıldığı sadece birkaç çalışma mevcuttur. Bu çalışma uçuş parametrelerinin belirlenmesine, bu gibi bölgelerde dikkat edilmesi gereken durumlara ve konumsal doğruluğunu etkileyen faktörlere odaklanılmasıyla ön plana çıkmaktadır. Antarktika Yarımadası'nda Horseshoe Adası'nda belirlenen bir test alanında gerçekleştirilen çalışmada PPK konum belirleme yönteminin konumsal doğruluğu araştırılmış olup bu yöntemin uygulanabilirliği test edilmiştir.

Uçuş bölgesi belirlenirken, adadaki vahşi yaşamın rahatsız edilmemesi ve çevreye herhangi bir zarar verilmemesine özen gösterilmiştir. Bölgedeki zamansal ve mekansal kısıtlamalar göz önünde bulundurularak en optimum şekilde uçuş planı hazırlanmıştır. 0 ila -10 °C arasında değişen hava sıcaklığı ve şiddetli rüzgarların

etkisinin, bataryaların orta enlemlerde sahip olduğu performansa göre %10-%20 daha az performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca bu koşullarda İHA'nın çalışabilmesi için bataryaların sıcak tutulması ve uçuşların vakit kaybedilmeden hemen gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda bataryaların uçuş sürecinde kullanımının yeterliliğine ve zamansal kısıtlamalara dikkat edilerek planlama yapılmıştır. Ayrıca benzer nitelikte yüzey özelliklerinin hakim olduğu bir bölge için örtü oranlarının yüksek tutulmasına ve optimum uçuş yüksekliğinde uçuşların gerçekleştirilmesine dikkat edilmiştir. Uçuş esnasında İHA'da mevcut GNSS alıcısı ile uydu gözlemleri gerçekleştirilirken eş zamanlı olarak referans istasyonunda mevcut GNSS alıcısı ile de uydu gözlem verileri toplanmıştır. Elde edilen görüntülerin ofis ortamında değerlendirilmesi sonrası fotoğraf merkezi koordinatları hassas bir şekilde hesaplanmış görüntü verileri bir dizi fotogrametrik işleme tabi tutulmuştur. Farklı noktalardan ve açılardan alınan 2B görüntülerden 3B model oluşturulmasını sağlayan güçlü SfM algoritmasına dayalı olarak ortofoto ve SYM ürünleri elde edilmiştir. Üretilen fotogrametrik ürünlerin ortalama YÖA 2.74 cm'dir. 3B koordinatlar için konumsal doğruluğu ise RTK yöntemiyle birkaç cm doğrulukta konumları belirlenmiş YKN koordinatlarıyla kıyaslanarak hesaplanmıştır. Çalışmada PPK yönteminin konumsal doğruluğu RMSE hesaplanarak sunulmuş olup yatay koordinat bileşenleri için bu değerler 1.05 cm ve 0.52 cm'dir. Düşey koordinat bileşeni için hesaplanan RMSE değeri 11.33 cm'dir. Referans istasyonu ve gezici arasındaki mesafelerin maksimum 1-1.5 km arasında olduğu göz önünde bulundurulduğunda yatay koordinat bileşenleri için elde edilen sonucun orta enlemlerde yapılan çalışmaların konum doğruluğuna ulaştığı görülmektedir. Çalışmada benzer bir iş akışı yer kontrol noktalarından bazıları rektifikasyon amaçlı kullanılarak da uygulanmış olup, fotogrametrik ürünlerin konumsal doğruluğunda hem yatay hem de düşey koordinat bileşenleri için cm mertebesine ulaşılmıştır.

Kutup bölgelerinde benzer çalışmalar uçuş görevlerine hazırlık aşamasında;

- İklim koşulları ve çevresel şartlara (soğuk, şiddetli rüzgar, yükseklik değişimi, kar/buzul alanlar, derin buzul yarıkları vb.) dikkat edilerek İHA ekipmanlarının seçilmesi,
- Soğuk havanın batarya performanslarını önemli oranda düşürmesi nedeniyle önlem alınması (yedek bataryalar, bataryaların devamlı şarj edilmesi vb.)
- Bataryaların uçuş öncesi sıcak tutulması ve uçuşa en uygun anda hemen uçuş görevinin başlatılması,
- YKN tesis edilecekse kaya vb. sağlam noktalara tesis edilmesi,
- Her an şiddetli kar yağışı olabileceğinden optimum koşullarda uçuş görevinin başlatılması,

önerilmektedir. Ayrıca sinyal bağlantı problemlerinin sıklıkla yaşanabileceği bu gibi bölgelerde PPK yöntemi, uçuş esnasında İHA ve referans istasyonu arasında veri iletişimi gerektirmemesi açısından kolaylık sağlamıştır. Bu çalışmada elde edilen konumsal doğruluk göz önünde bulundurularak, arazide sağlam olduğu bilinen birkaç

noktaya yer kontrol noktası tesis edilmesi önerilmektedir. Kutup bölgelerde gerçekleştirilecek benzer çalışmalarda bu yöntem kullanılarak uzun periyotlarda buzul bölgelerdeki ve kıyı alanlarındaki değişiklikler izlenebilir. Kar/buzul alanlarındaki ve hacimlerindeki değişiklikler ortaya koyulabilir. Ayrıca buzul yarıkları izlenerek hareket hızları takip edilebilir. Kar/buzul dinamiklerini anlamak, iklim değişikliği ve çevresel değişikliklerin etkilerini daha iyi anlamak için önemli olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 121N033 numaralı TÜBİTAK projesi desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan insansız hava aracı verileri, T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Kutup Araştırmaları Enstitüsü koordinasyonunda düzenlenen 6. Ulusal Antarktika Bilim Seferi sürecinde elde edilmiştir.

Bu çalışma, Prof. Dr. Burak AKPINAR danışmanlığında, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Programı, Yüksek Lisans öğrencisi Esra GÜNAYDIN tarafından gerçekleştirilen "Buzul Alanlarda İnsansız Hava Aracı Verileri ile Üretilen Fotogrametrik Ürünlerin Konumsal Doğruluğunun İncelenmesi" başlıklı ve 807023 Tez No'lu yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] J. Turner and G. J. Marshall, Climate change in the polar regions. Cambridge University Press, UK, 2011.
- [2] IPCC, IPCC Sixth Assessment Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>, Accessed 5 May 2024.
- [3] D. Jayaram, Geopolitics, Environmental Change and Antarctic Governance: A Region in Need of a Transformative Approach to Science Diplomacy. in Assessing the Antarctic Environment from a Climate Change Perspective, N. Khare, Ed., Earth and Environmental Sciences Library., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 1-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87078-2_1
- [4] J. Turner and J. Overland, Contrasting climate change in the two polar regions, Polar Res., 28(2), 146-164, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2009.00128.x>
- [5] A. Bhardwaj, P. K. Joshi, L. Sam and Snehmani, Remote sensing of alpine glaciers in visible and infrared wavelengths: a survey of advances and prospects, Geocarto Int., 31 (5), 557-574, 2016. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1059903>
- [6] R. Ramsankaran, P. J. Navinkumar, A. Dashora and A. V. Kulkarni, UAV-Based Survey of Glaciers in Himalayas: Challenges and Recommendations. J.



- Indian Soc. Remote Sens., 49 (5), 1171-1187, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01300-7>
- [7] K. Lamsters, J. Karušs, M. Krievāns and J. Ješkins, High-resolution orthophoto map and digital surface models of the largest Argentine Islands (the Antarctic) from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *J. Maps*, 16 (2), 335-347, 2020. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1748130>
- [8] A. Lucieer, D. Turner, D. H. King and S. A. Robinson, Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 27, 53-62, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.011>
- [9] P. Pina and G. Vieira, UAVs for science in Antarctica, *Remote Sens.*, 14 (7), 1610, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14071610>
- [10] M. Dałbski, A. Zmarz, P. Pabjanek, M. Korczak-Abshire, I. Karsznia and K. J. Chwedorzewska, UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology*, 290, 29-38, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.033>
- [11] G. Tarca, M. Guglielmin, P. Convey, M. R. Worland and N. Cannone, Small-scale spatial-temporal variability in snow cover and relationships with vegetation and climate in maritime Antarctica. *Catena*, 208, 105739, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105739>
- [12] J. Tomašík, M. Mokroš, P. Surový, A. Grznárová and J. Merganič, UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas?. *Remote Sens.*, 11 (6), 721, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11060721>
- [13] T. Tarık ve T. ÖCALAN, PPK GNSS sistemine sahip insansız hava araçları ile elde edilen fotogrametrik ürünlerin doğruluğunun farklı yaklaşımlarla irde lenmesi, *Türkiye Fotogram. Derg.*, (1), 22-28, 20 20.
- [14] P. Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega and F. Carvajal-Ramírez, Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations. *Geocarto Int.*, 38 (1), 2197507, 2023. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197507>
- [15] D. P. Bliakharskii and I. V. Florinsky, Unmanned aerial survey for modelling glacier topography in Antarctica: first results. *Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 319-326, 2018.
- [16] T. R. Chudley, P. Christoffersen, S. H. Doyle, A. Abellan, ve N. Snooke, High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control, *The Cryosphere*, 13(3), 955-968, 2019. <https://doi.org/10.5194/tc-13-955-2019>
- [17] Belloni vd., High-resolution high-accuracy orthophoto map and digital surface model of Forni Glacier tongue (Central Italian Alps) from UAV photogrammetry”, *J. Maps*, 19(1), 2217508, 2023. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2217508>
- [18] L. Tang, G. Qiao, B. Li, X. Yuan, H. Ge and S. Popov, GNSS-supported direct georeferencing for UAV photogrammetry without GCP in Antarctica: a case study in Larsemann Hills. *Mar. Geod.*, 1-28, 2024. <https://doi.org/10.1080/01490419.2024.2316089>
- [19] I. Owens ve P. Zawar-Reza, *Weather and Climate, içinde Exploring the Last Continent: An Introduction to Antarctica*, D. Liggett, B. Storey, Y. Cook, ve V. Meduna, Ed., Cham: Springer International Publishing, 91-114, 2015.
- [20] NSF, Ice Sheets, <https://www.nsf.gov/geo/opp/antarct/science/icesheet.jsp>, Accessed 19 Sep 2024.
- [21] N. Mölg ve T. Bolch, Structure-from-Motion Using Historical Aerial Images to Analyse Changes in Glacier Surface Elevation, *Remote Sens.*, 9(10), 10, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9101021>
- [22] C. Yıldırım, Geomorphology of Horseshoe Island, Marguerite Bay, Antarctica. *J. Maps*, 16(2), 56-67, 20 20. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1692700>
- [23] A. E. Frazier and K. K. Singh, *Fundamentals of capturing and processing drone imagery and data*. CRC Press, USA, 2021
- [24] E. Ferrer-González, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez and P. Martínez-Carricondo, UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sens.*, 12 (15), 2447, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
- [25] B. Ruzgienė, T. Berteška, S. Gečyte, E. Jakubauskienė and V. Č. Aksamitauskas, The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*, 73, 619-627, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.018>
- [26] A. S. Pillai, S. Mahato, M. Goswami, P. Banerjee and A. Bose, Potential of GNSS Post Processing Kinematic (PPK) Technique for Test Range Surveying Applications using Compact, Low Cost GNSS Modules. 2022 URSI Regional Conference on Radio Science (USRI-RCRS), 1-4, 2022. <https://doi.org/10.23919/URSI-RCRS56822.2022.10118459>
- [27] S. Del Pizzo, A. Angrisano, P. Aucelli, G. Cappello, G. Mattei and S. Troisi, Coastal monitoring assessment using a low-cost PPK-UAV setup for photogrammetric survey. 2023 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), 187-191, 2023. <https://doi.org/10.1109/MetroSea58055.2023.10317484>
- [28] Emlid, How PPK works. <https://docs.emlid.com/reach/tutorials/basics/ppk-introduction/>, Accessed 10 May 2024.
- [29] Dji, <https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4-pro>, Accessed 19 Sep 2024.





Kırmızıbiberin vakum destekli mikrodalga tekniği ile kurutulması

Drying of red pepper by microwave-vacuum technique

Cem Baltacıoğlu^{1,*} , Duygu Boz² 

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

Öz

Bu çalışmada %91.74 neme sahip tatlı kırmızıbiberler (*Capsicum annuum* L.) vakum destekli mikrodalgada veya sıcak hava fırınında ile %10 nem içeriğinin altına düşürülmüştür. Vakum destekli mikrodalga prosesinde istenilen nem seviyesine ulaşmak için geçen süre 45-90dk, etüvde ise 480dk olarak belirlenmiştir. Vakum destekli mikrodalga yöntemi ve sıcak hava ile etüvde kurutulan kırmızıbiber örneklerinde toplam antioksidan aktivite, toplam fenolik madde ve toplam monomerik antosiyanin analizleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek değerler vakum destekli mikrodalga prosesinde elde edilmiştir. Sıcak havada kurutulan kırmızıbiber örneklerinin askorbik asit miktarında vakum-mikrodalga prosesine göre %74.46 oranında azalma gözlemlenmiştir. Taze bibere en yakın renk parametreleri ve toplam renk değişimi en az vakum-mikrodalga kurutma tekniğinde elde edilmiştir. İstatiksel açıdan mikrodalga gücünün kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin kimyasal ve fiziksel kalite özellikleri üzerine etkisi vakum basıncından daha belirgin olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kırmızıbiber, Kurutma, Mikrodalga, Vakum

1 Giriş

Kırmızıbiber, patlıcangiller (Solanaceae) ailesinin *Capsicum* cinsine bağlı, ılıman iklime sahip bölgelerde tek yıllık (*Capsicum annuum*), tropik iklime sahip bölgelerde ise çok yıllık (*Capsicum frutescens*) olarak yetiştirilen bir kültür bitkisidir [1-3]. Taze ve kurutulmuş olarak geniş bir kullanım alanına sahip olan kırmızıbiber dünyada ve Türkiye’de üretim ve işletme endüstrisi açısından önemli bir kültür bitkisidir. Kırmızıbiber günlük yemeklerde, salça ve soslarda, endüstriyel ürünlerde kullanılan bir bitkidir. Yetiştirme koşulları, hasat dönemi ve iklime göre değişiklik gösterse de bileşiminde başlıca C vitamini olmak üzere E, B1, B2, B3, A vitaminleri bulunmaktadır. Renk maddelerinden beta karoten, kapsantin, zeaksantin, kriptokapsantini, fenolik bileşikler olarak karotenoidi, gallik asit, vanilik asit, resveratrol, kateşinhidratı, minerallerden ise Ca, Fe, Mg, P, S ve Na’yı içermektedir [4]. Gıdalarda kurutma bilinen en eski kurutma yöntemlerindedir. Kurutma doğal ve yapay olarak ikiye ayrılmaktadır, ancak doğal kurutma kalite dezavantajlarından dolayı tercih edilmemektedir. Endüstride yapılan sıcak hava kurutma standart ürün elde etmek adına tercih edilmektedir [5].

Abstract

In this study, sweet red peppers (*Capsicum annuum* L.) with 91.74% moisture content were reduced below 10% moisture content with vacuum assisted microwave and hot air oven. The time taken to reach the desired moisture level in the microwave-vacuum process was determined to be 45-90min and 480min in the oven. Total antioxidant activity, total phenolic matter and total monomeric anthocyanin were analyzed in red pepper samples dried by vacuum-assisted microwave method and hot air and oven. The highest values were obtained in the vacuum assisted microwave process. The ascorbic acid content of hot air dried red pepper samples decreased by 74.46% compared to the vacuum-microwave process. The closest color parameters to fresh pepper and the least total color change were obtained in vacuum-microwave drying technique. Statistically, the effect of microwave power on the chemical and physical quality characteristics of dried red pepper samples was more significant than vacuum pressure.

Keywords: Red pepper, Drying, Microwave, Vacuum

Mikrodalga ile yapılan çalışmalarda kurutma zamanı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Düşük güçlerde mikrodalga kullanımı ile yapının korunmasında ve besleyici unsurların parçalanması daha az olmaktadır. Kısa sürede ısıtma yapabilmesi avantajı ile mikrodalga kurutmada önemi artan yöntemlerden birisidir. Diğer taraftan vakum destekli mikrodalga kurutma ile yapılan çalışmalar klasik yöntemler ile karşılaştırıldığında daha poroz yapıda, yüksek kuruma oranında bir değer elde edilmiştir. Bunun yanı sıra daha düşük yığın yoğunluğu ile beraber düşük derecede buruşma elde edilmiştir. Mikrodalga ve vakum birlikte kullanılarak yapılan çalışmalarda geleneksel yöntemlere göre daha yüksek rehidrasyon oranının yanı sıra daha düşük su tutma kapasitesine, sertliğe, esnekliğe, yapışkanlığa ve çignenebilirliğe sahip örnekler elde edilmiştir [6-9]. Mikrodalga kullanımının kurutma üzerine olan olumlu etkileri görülmektedir ve bu çalışmada kullanılmasına neden olmuştur. Mikrodalga fırını avantajları nedeniyle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada kırmızıbiber farklı vakum seviyelerinde (0.02 MPa, 0.04 MPa ve 0.06 MPa) ve mikrodalga güçlerinde (180 W, 360 W, 600 W ve 900 W) kurutulmuştur. Alternatif

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cembaltacioglu@ohu.edu.tr (C. Baltacıoğlu)
Geliş / Received: 23.09.2024 Kabul / Accepted: 07.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1554616

kurutma yöntemi olarak kırmızıbiberler sıcak hava kurutma yöntemiyle farklı sıcaklıklarda (60 °C, 70 °C ve 80 °C) kurutulmuştur. Mikrodalga destekli vakum kurutma yöntemi ve geleneksel yöntem ile elde edilen örneklerde nem, renk, toplam fenolik madde, toplam antioksidan aktivite, toplam monomerik antosiyanin, askorbik asit tayini ve temel bileşen analizi gerçekleştirilmiştir.

2 Materyal ve metod

Çalışmada kullanılan kırmızıbiberler (*Capsicum annum* L.) Niğde'nin yerel bir marketinden tek seferde temin edilmiştir. Kurutma işlemine kadar geçen sürede buzdolabında (Arçelik, Türkiye) +4 °C' de muhafaza edilmiştir.

2.1 Kurutma

Kırmızıbiberler çekirdeksiz şekilde 3 mm kalınlığında yuvarlak formda dilimlenmiştir. Kırmızıbiberlerin kurutulması, mikrodalga fırın (Arçelik Intolwave, Türkiye), fırına dış ünite olarak bağlanan vakum pompası (Isolab Vacuum Pump, Almanya) ve fırının içerisinde oluşturulan sızdırmaz cam ünite sayesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Mikrodalga fırında 180 W, 360 W, 600 W ve 900 W güç değerleri kullanılmıştır. Vakum pompasında ise 0.02 MPa, 0.04 MPa ve 0.06 MPa basınç değerleri seçilmiştir. Kurutulan örneklerin 30 dk aralıklarla tartımları alınmıştır ve kurutma işlemi 0.11 kg H₂O kg⁻¹ (kuru bazda) seviyesi altına düşene kadar devam etmiştir.

Sıcak hava kurutma işlemi hava sirkülasyonlu etüvde (Isotex, Türkiye) gerçekleştirilmiştir. Dilimlenen örnekler 60 °C, 70 °C ve 80 °C'de aynı nem değerine düşene kadar kurutulmuştur.



Şekil 1. Vakum destekli mikrodalga kurutma sistemi

2.2 Nem tayini

Kırmızıbiberlerin nem içeriği, 90 °C'de 72 saat kurutulmadan önce ve kurutulduktan sonra test numunesinin ağırlıklarından standart bir yöntem (AOAC 1984) kullanılarak belirlenmiştir [10].

2.3 Renk tayini

Kırmızıbiber dilimlerinde renk özelliklerini belirlemede renk tayini cihazı (Konica Minolta CR400, Japonya) kullanılmıştır. Renk değerleri toz haline getirilen örnekler üzerinden yapılmıştır. L^* , a^* , b^* , C, h, BI, ΔE değerleri Denklem 1-4'e göre hesaplanmıştır. L^* parlaklığı göstermekte olup $L^*=0$ siyah ve $L^*=100$ beyaza karşılık

gelmektedir. $+a^*$ değeri kırmızılığı, $-a^*$ değeri yeşilliği, $+b^*$ değeri sarılığı ve $-b^*$ değeri de maviliği göstermektedir.

$$C: \text{Kroma (Renk doygunluğu)} = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$h: \text{Renk Açısı (Ton açısı)} = \tan^{-1}(a^*/b^*) \quad (2)$$

$$\text{BI (Esmerleşme indisi)} = [100(X-0.31)] / 0.17 \quad (3)$$
$$X = (a^*+1.75L^*) / (5.645L^*+a^*-3.012b^*)$$

$$\Delta E (\text{Toplam renk farkı}) = [(L_0-L^*)^2 + (a_0-a^*)^2 + (b_0-b^*)^2]^{1/2} \quad (4)$$

2.4 Toplam fenolik madde tayini

Kurutulmuş kırmızıbiber numuneleri öğütülmüş ve 0.1 g tartılmış ve fenolik bileşikleri ekstrakte edebilmek için %80 metanol çözeltisi (% 1 HCl içeren) kullanılmıştır. Toplam fenolik madde miktarı Folin-Ciocalteu yöntemine göre belirlenmiştir [11]. Çözeltiler hazırlandıktan sonra tüplere mikro pipet (Isolab, Almanya) yardımıyla 25 μ L örnek 75 μ L saf su ve 750 μ L folin çözeltisi ilave edilmiş ve vortekslelendikten (Isolab, Almanya) sonra 5 dk. bekletilmiştir. Ardından 750 μ L NaCO₃ (75g/L) eklendikten sonra tekrar vortekslenmiştir ve 1 saat karanlıkta bekletilmiştir. Karanlıkta bekletilen örneklerin 725 nm'de UV-VIS spektrofotometrede (Thermo Scientific Evolution 300, ABD) absorbansları belirlenmiştir. Referans olarak gallik asit kullanılarak sonuçlar kg örnek başına mg gallik asit eşdeğeri (GAE) olarak ifade edilmiştir (mg GAE/ kg örnek). Gallik asit standardı; 1.9 ml gallik asit üzerine 9.5 ml saf su ilave edilerek stok çözeltisi hazırlanmış, ardından 0.5 μ L; 1 μ L; 1.5 μ L miktarlarında stok çözeltiden 3 ayrı örnek alınmıştır. Alınan örnekler üzerine sırasıyla 1.5 μ L, 1 μ L, 0.5 μ L saf su eklendikten sonra örnekler 750 μ L folin çözeltisi ve 750 μ L NaCO₃ ile tamamlanmıştır. Hazırlanan örnekler, 100 μ L saf su, 750 μ L folin, 750 μ L NaCO₃ ile hazırlanmış şahite karşı spektrofotometrede absorbansı belirlendikten sonra GAE eşdeğeri elde edilmiştir.

2.5 Toplam antioksidan aktivite tayini

Kurutulmuş ve yaş kırmızıbiberde serbest radikal yakalama deneyi, 1,1-difenil-2-pikrilhidrazil (DPPH) radikali kullanılarak Blois metodu gerçekleştirilmiştir. DPPH metodu örnek ekstraktların proton veya elektron verebilme yeteneğine göre eklenen mor renkli DPPH çözeltisinin örneklerin rengini açması prensibine dayanmaktadır [12]. Reaksiyon karışımının absorbansının düşmesi yüksek serbest radikal giderme aktivitesinin göstergesidir. Kurutulmuş kırmızıbiber numunelerinden 100 μ L örnekler tüplere alındıktan sonra, 3.9 ml DPPH çözeltisi eklenmiştir. Vortekslenen tüpler 30 dk karanlıkta bekletildikten sonra spektrofotometrede 517 nm dalga boyunda şahite karşı absorbansı belirlenmiştir. Kontrol örneği için, örnek yerine 100 μ L %80'lik metanole 3.9 ml DPPH çözeltisi kullanılmıştır. Şahit hazırlanmasında diğer örneklerden farklı olarak kullanılan örnek ve DPPH miktarı kadar %80'lik metanol kullanılarak hazırlanmıştır. Yüzde inhibisyon değerleri Denklem 5'e göre hesaplanmıştır.

(A_{kontrol} : Kontrol örneğinin absorbanans değeri, $A_{\text{örnek}}$:Örnek ekstraktının absorbanans değeri)

$$\% \text{ İnhibisyon} = ((A_{\text{kontrol}} - A_{\text{örnek}}) / A_{\text{kontrol}}) * 100 \quad (5)$$

2.6 Toplam monomerik antosiyanin tayini

Toplam monomerik antosiyanin tayini için kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinden 0.2 g tüplere konulmuştur. Ardından 12 ml %80'lik metanol (%1ml HCL çözeltisi içeren) çözeltisi eklendikten sonra tüpler vortekslenmiştir. Sedimentasyon cihazına bırakılan tüpler 4 saat sonunda filtre kağıdından geçirilerek süzölmüş ve analiz için hazır hale getirilmiştir. Kurutulmuş kırmızıbiberlerin toplam monomerik antosiyanin tayini spektrofotometrik yöntemle pH diferansiyel metoduna göre belirlenmiştir [13]. Topam monomerik antosiyanin miktarı **Denklem 6 ve 7**'ye göre hesaplanmıştır. Bu denklemlerde; A: Düzeltilecek hesaplanan absorbanans farkını, TMA: Toplam antosiyanin miktarını, MA: Standart antosiyaninin (siyanidin 3-galaktozit) molekül ağırlığını (445.2), SF: Seyreltme faktörünü, MS: Standart antosiyaninin molar absorpsiyon katsayısını (30200) göstermektedir.

$$A = (A_{\text{max}} - A_{700})_{\text{ph1}} - (A_{\text{max}} - A_{700})_{\text{ph4.5}} \quad (6)$$

$$\text{TMA} = (A \times \text{MA} \times \text{SF} \times 1000) / \text{MS} \quad (7)$$

2.7 Askorbik asit tayini

Kurutulmuş kırmızıbiberde askorbik asit tayini HPLC (Shimadzu LC-20A, ABD) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Analiz için %30 metanol çözeltisi ile %2.5 fosforik asit çözeltisi kullanılmıştır. Analizin ilk aşamasında -18 °C sıcaklıkta muhafaza edilen toz haline getirilmiş kuru kırmızıbiber numunelerinde 0.1 g örnekler 10 ml fosforik asitle tamamlanıp, 5 dk vorteks (Isolab, Almanya) cihazında karıştırılmıştır. Vorteksten geçirilen numuneler santrifüj cihazı 9000 devir/dk (Nüve NF 800R, Türkiye) ayarlanarak partiküllerin çökmesi numunenin berrak kısmının açığa çıkması sağlanmıştır. Berrak kısmı alınan numuneler 0.45 µm filtreden süzülerek analiz için hazır duruma getirilmiştir. Sonuçların hesaplanması askorbik asit standart eğrisi üzerinden yapılmıştır.

2.8 Kemometrik analiz

Temel bileşen analizi (PCA) Minitab 18 (Minitab Inc.State Collage PA, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Temel bileşen analizi kurutulmuş kırmızıbiberlerde vakumun ve mikrodalga gücünün etkisini ayırt etmek için kullanılmış ve sonuçlar skor grafiğinde sunulmuştur.

2.9 İstatistiksel analiz

Veriler Minitab 18.0 (Minitab Inc. State College, PA, ABD) paket programı kullanılarak %95 güven aralığında analiz edilmiştir. Gruplar arasında anlamlı fark olup olmadığını belirlemek için Tukey's çoklu karşılaştırma test yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Başlangıçta %91.74±0.2 nem içeriğinde olan kırmızıbiberler vakum destekli mikrodalga kurutma ve sıcak hava kurutma işlemlerinde %10 nem değeri altına inene kadar kurutulmuştur. Yapılan kurutma işlemlerinde en kısa kuruma süresi 600 W güçte 0.06 MPa vakum basıncında elde edilmiştir. Kurutma süresi mikrodalga gücü ve vakum basıncına bağlı olarak değişim göstermiştir. Mikrodalga ve vakum kurutma sisteminde ortalama kurutma süresi 45-90 dk arasında değişim göstermiştir. Vakum destekli yapılan kurutmada ilk 30 dk'da yaş ağırlığın %65.5±0.4'ü uzaklaşmıştır. Takip edilen süre zarfında ilk 30 dk süre içerisinde yüksek miktarda nemin uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Kurutma işleminde genel olarak iki kuruma periyodu gözlemlenmiştir. İlk periyotta gıdanın yüzeyinin su ile doymuş olması durumunda iken sabit hız periyodunda kuruma yüksek hızda gerçekleşmiştir. İkinci periyotta ise kırmızıbiber numunelerinin ıslak yüzeydeki nem içeriği tüm yüzeyi doyurmayacak düzeye geldiğinde, kurutma hızı kademeli olarak azalmıştır ve azalan hız periyodu gözlenmiştir, uzun zamanda daha az su uzaklaşmıştır, bu durum literatürde bulunan kurutma modelleri ile uygunluk göstermektedir [14]. Yapılan bir çalışmada ultrases destekli vakum kombine kurutma sisteminde kırmızıbiber kurutulmuş, kurutma süreleri fırın iç sıcaklığı ile ters orantılı olarak değişmiş olması çalışmamızı destekler niteliktedir [15]. Tian vd. yaptığı mikrodalga vakum kombinasyonlu çalışmada en kısa kurutma süresini 600 W mikrodalga gücü ve 0.06 MPa vakumda elde ettiklerini ifade etmişlerdir. En yavaş kurutma işlemini 180 W ve 0.02 MPa'da kaydetmişlerdir [16]. Bu çalışmada elde edilen veriler, kurutma süresi ve mikrodalga gücü arasındaki ilişki yapılan bu çalışmayı destekler niteliktedir.

3.1 Toplam fenolik madde

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde (Tablo 1) en yüksek fenolik madde içeriği vakum destekli mikrodalga kurutmada parametrelerinde 360 W/0.04 MPa, en düşük fenolik madde içeriği 180 W/0.02 MPa gözlemlenmiştir. Mikrodalga gücündeki değişim toplam fenolik üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Buna karşın uygulanan vakum basıncındaki değişim 0.02 ve 0.04 MPa değerlerinde etkili olurken ($p < 0.05$), 0.06 MPa değerinde istatistiksel olarak etkili olmamıştır ($p \geq 0.05$). Sıcak havada yapılan kurutmada ise 60 °C, 70 °C ve 80 °C'de elde edilen toplam fenolik değerleri sırasıyla 16062.41±1614, 15592.57±2957 ve 14698.56±1748 mgGAE/kgKM olarak tespit edilmiştir. Etüv sıcaklığındaki değişimin anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür ($p \geq 0.05$).

Yapılan bir çalışmada kırmızıbiberlerin sıcak hava kurutulması sonucunda toplam fenolik madde miktarı değişimleri incelenmiştir. Taze kırmızıbiberin fenolik madde içeriği 1359±148 mg gallik asit/100 g, 50-90 °C arasında sıcaklık arttıkça toplam fenolik madde miktarı 400 mg gallik asit/100 g altına düştüğü görülmüştür. Kurutma sıcaklığı artışı ile toplam fenolik madde içeriğinde azalma olduğu bildirilmiştir [17]. Bu verilerin yapılan bu çalışma ile paralel olduğu görülmektedir. Yapılan başka bir çalışmada ise ticari ve organik kırmızıbiberler farklı kurutma yöntemleri

izlenerek kurutulmuş ve elde edilen sonuçlara göre taze biberlerde 369 ile 1014 mg/kg değerinde toplam fenolik madde tespit edilmiştir. Sıcak hava, kesikli mikrodalga ve kızılötesi yöntemler ile yapılan kurutma yöntemleri sonucunda fenolik içeriği açısından değerlendirildiğinde en yüksek değer kızılötesi kurutma yöntemi ile elde edilmiştir. Burada mikrodalga ile yapılan kurutmada fenolik madde açısından kızılötesine göre daha düşük değerler elde edilmiştir [18].

Tablo 1. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin toplam fenolik madde miktarları

Güç	Vakum (MPa)	Toplam fenolik madde (mg GAE/kg KM)
180 W	0.02	^{Bb} 13225.24±1094.80
	0.04	^{Ba} 13759.49±708.519
	0.06	^{Bab} 16467.19±1323.59
360 W	0.02	^{Ab} 17914.80±915.17
	0.04	^{Aa} 21937.79±2832.3
	0.06	^{Aab} 14791.66±1416.04
600 W	0.02	^{Ab} 13881.19±979.91
	0.04	^{Aa} 17680.60±3299.4
	0.06	^{Aab} 18117.65±1321.08
900 W	0.02	^{Bb} 15856.12±833.52
	0.04	^{Ba} 14367.54±1518.46
	0.06	^{Bab} 13539.19±865.63

Tabloda aynı sütunda büyük harfle gösterimde farklı harf gücün fenolik madde üzerine etkili olduğunu, farklı küçük harf basıncın fenolik madde üzerine etkili olduğunu istatistiksel olarak göstermektedir ($p<0.05$).

Mevcut çalışmada ve literatürde bulunan çalışmalarda mikrodalga kullanılarak yapılan kurutma yöntemlerinde fenolik değer daha düşük bulunmuştur. Bunun sebebi mikrodalgada ulaşılan sıcaklık ve uygulanan güç değerleri olarak belirtilmiştir. Ayrıca polifenollerin proteinler gibi diğer bileşiklerle bağlanması ve kurutma sırasında polifenollerin kimyasal yapılarındaki değişiklikler neden olmuştur [19]. Toplam fenolik madde değerleri incelendiğinde mikrodalga vakum destekli kurutma ile sıcak hava ile yapılan kurutmaya göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Buda hızlı sıcaklık artışı nedeniyle polifenoloksidaz gibi enzimlerin inaktive olmasından ve polifenollerin korunmasından kaynaklandığı şeklinde açıklanmaktadır [20].

3.2 Toplam antioksidan aktivite

Vakum destekli mikrodalga ile farklı güç ve vakum değerlerinde kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin toplam antioksidan miktarları Tablo 2’de verilmiştir. Yapılan çalışmada toplam antioksidan aktivite 32.25-44.06 (%inhibisyon) değerleri arasında bulunmuştur. En yüksek %inhibisyon değeri 600 W mikrodalga gücünde 0.06 MPa

vakum basıncında, en düşük ise 180 W güç 0.02 MPa basınçta gözlemlenmiştir. Kurutma süresinin kısalmasıyla antioksidan aktivite artış göstermiştir. Sıcak hava ile kurutulmuş numunelerin antioksidan aktiviteleri 34.03-36.46 (% inhibisyon) aralığında bulunmuştur. İki kurutma yöntemiyle kurutulmuş kırmızıbiber numunelerin toplam antioksidan miktarları yaklaşık değerlerde gözlemlenmiştir. Sıcak hava ile kurutulmuş örneklerdeki toplam antioksidan aktivite değerleri arasındaki fark istatistiksel açıdan önemsiz olmuştur ($p\geq 0.05$). İstatistiksel açıdan toplam antioksidan aktivite değerleri incelendiğinde (Tablo 2), 180 W ve 360 W değerlerinde mikrodalga gücünü değiştirmenin antioksidan aktivite üzerinde etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Yine aynı şekilde 600 W ve 900 W mikrodalga güç değerlerinde de mikrodalga gücünü değiştirmenin antioksidan aktivite üzerine istatistiksel açıdan etkisinin olmadığı görülmüştür ($p\geq 0.05$). Genel olarak gücün antioksidan aktiviteye etkisi değerlendirildiğinde mikrodalga gücünü 180 W ve 360 W’ dan 600 W ve 900 W’ a çıkarmak antioksidan aktivitede artış olduğu gözlemlenmiştir. Genel toplam antioksidan tablosuna bakıldığında istatistiksel açıdan $p<0.05$ olduğundan gücü değiştirmek toplam antioksidan aktivitenin artmasında etkili olduğu görülmüştür. Vakumun antioksidan aktivite üzerinde etkisi incelendiğinde istatistiksel açıdan vakum basıncını değiştirmenin toplam antioksidan aktivite üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür ($p\geq 0.05$).

Tablo 2. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin toplam antioksidan aktivite değerleri

Güç	Vakum (MPa)	Antioksidan Aktivite (% inhibisyon)
180 W	0.02	^{Ba} 32.25±2.29
	0.02	^{Ba} 32.82±1.14
	0.06	^{Ba} 34.01±0.56
360 W	0.02	^{Ba} 36.24±2.67
	0.04	^{Ba} 37.70±1.83
	0.06	^{Ba} 32.36±1.93
600 W	0.02	^{Aa} 41.93±0.81
	0.04	^{Aa} 37.00±2.23
	0.06	^{Aa} 44.06±1.32
900 W	0.02	^{Aa} 39.00±3.06
	0.04	^{Aa} 39.13±1.27
	0.06	^{Aa} 38.50±0.83

Tabloda aynı sütunda büyük harfle gösterimde farklı harf gücün antioksidan madde üzerine etkili olduğunu, farklı küçük harf basıncın antioksidan madde üzerine etkili olduğunu istatistiksel olarak göstermektedir ($p<0.05$).

Antioksidan kapasitesinin azalması kısmen kurutma süresi ve sıcaklığıyla ilgilidir, hem uzun süre hem de yüksek sıcaklık antioksidan potansiyeli olan fitokimyasalların

oksidasyonunu ve bozunmasını artırır [21, 22]. Antioksidan aktivite tek bir fitokimyasal bileşiğin aktivitesinden kaynaklanmayıp hem C vitamini hem de fenolik bileşenlerle ilişkili olduğunu bildirilmiştir. Bu nedenle, antioksidan kapasite açısından ürün kalitesi, kurutma işlemleri sırasında meydana gelen ısı kaynakları kimyasal reaksiyonların geniş bir yelpazesi olarak düşünülmelidir [23].

3.3 Renk

Capsicum annuum türü kırmızıbiber çeşitleri ise özellikle kapsantin ve kapsorubin açısından çok önemli zengin karotenoid kaynaklarıdır. Kapsantin, *Capsicum annuum* çeşidi biberin en önemli renk maddesi olduğu bilinmektedir [24]. Taze kırmızıbiberde L^* , a^* ve b^* değerleri sırasıyla 32.51 ± 1.12 , 16.75 ± 1.07 ve 12.89 ± 1.18 olarak ölçülmüştür. L^* değeri parlaklık değeri olup, kurutma işlemi sonunda en yüksek parlaklık 900 W mikrodalga gücünde gözlemlenirken, en düşük parlaklık 180 W' da elde edilmiştir (Tablo 3). Aynı mikrodalga gücünde basıncı değiştirmek renk değerlerinin hepsinde istatistiksel olarak etkili olmazken ($p \geq 0.05$), mikrodalga gücünü değiştirmek önemli bulunmuştur ($p < 0.05$). a^* değeri kırmızılık ölçüsü olup, en yüksek a^* değeri taze bibere göre %12.01 artış göstererek 180 W/0.06 MPa mikrodalga güç-vakum basıncı parametresinde bulunmuştur. 180 W ve 900 W mikrodalga güçlerinde $p < 0.05$ olduğundan dolayı gücü değiştirmek a^* değerini etkilemiştir. 360 W ve 600 W mikrodalga güçlerinde ise $p \geq 0.05$ olduğundan istatistiksel açıdan gücün değiştirilmesi a^* değerini etkilemediği görülmüştür. Vakum basıncını değiştirmek istatistiksel açıdan $p < 0.05$ olduğundan kırmızıbiberin a^* değerini etkilediği görülmüştür. b^* değeri sarılık ölçütü olup, en yüksek b^* değeri 900 W/0.06 MPa mikrodalga gücü-vakum basıncında elde edilmiştir. 180 W ve 600 W mikrodalga güçlerinde $p > 0.05$ olduğu gözlemlenmiş olup istatistiksel açıdan gücü değiştirmenin b^* değerini etkilemeyeceği söylenebilir. Diğer taraftan 360 W ve 900 W mikrodalga güçlerinde $p < 0.05$ olduğundan gücü değiştirmek b^* değerini etkilemiştir. Vakum destekli mikrodalga kurutma yönteminde kırmızıbiberin kurutulmasında vakum basıncını değiştirmenin b^* değeri üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir.

Sıcak hava kurutma yöntemi ile yapılan kurutma işleminde 60 °C'de elde edilen L^* , a^* ve b^* değerleri sırasıyla 60.46 ± 0.11 , 26.29 ± 0.17 ve 37.12 ± 0.09 olarak ölçülmüştür ve sıcaklık artışı ile (70 °C ve 80 °C'de) bu değerlerde önemli bir azalma tespit edilmiştir. Yapılan bir çalışmada kırmızı şili biberini (*Capsicum frutescens* L.) farklı sıcaklık ve vakum basınçlarında kurutulmuştur. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerini ile taze biberin (L^* , a^* , b^* , C, a^0) karşılaştırılması sonucu en iyi renk parametresi 75 °C sıcaklıkta ve 0.05 kPa vakum kombinasyonunda elde edildiği gözlemlenmiştir [25]. Yapılan bir çalışmada *Capsicum frutescens* L. türü şili biberlerinin sıcak hava-vakum kombinasyonu ile kurutulması ile elde edilen sonuçlar *Capsicum annuum* türü kırmızı kapa biberlerin vakum destekli mikrodalga kurutma yöntemiyle elde ettiğimiz sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Farklı sıcaklıkların ve vakum uygulamasının uygulandığı bir çalışmada vakum uygulaması ile birlikte sıcaklık artışı L^*

değerinde azalmaya neden olmuştur. a^* ve b^* değerlerinde ise sıcaklığın ve vakumun istatistiksel açıdan önemli değişimlere neden olduğu görülmektedir [18]. Mevcut çalışmada da renk değerleri üzerine mikrodalga gücünü değiştirmek önemli etkiye sahiptir.

Tablo 3. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin L^* , a^* ve b^* değerleri

Güç (W)	Vakum (MPa)	L^*	a^*	b^*
180 W	0.02	^{Ba} 42.39 ± 0.27	^{Bb} 15.88 ± 0.08	^{Bb} 15.58 ± 0.38
	0.04	^{Bb} 35.63 ± 0.29	^{Bc} 12.01 ± 0.64	^{Bc} 7.23 ± 0.71
	0.06	^{Ba} 38.66 ± 1.73	^{Ba} 18.78 ± 0.08	^{Ba} 13.37 ± 0.01
360 W	0.02	^{Ca} 36.68 ± 0.13	^{Cb} 14.02 ± 0.14	^{Cb} 9.35 ± 0.06
	0.04	^{Cb} 37.56 ± 0.19	^{Cc} 13.73 ± 0.55	^{Cc} 10.58 ± 0.19
	0.06	^{Ca} 38.80 ± 0.90	^{Ca} 14.34 ± 0.53	^{Ca} 12.01 ± 0.98
600 W	0.02	^{Ba} 40.01 ± 0.91	^{Cb} 14.94 ± 0.40	^{Bb} 12.58 ± 0.64
	0.04	^{Bb} 37.36 ± 0.31	^{Cc} 10.30 ± 0.43	^{Bc} 8.84 ± 0.26
	0.06	^{Ba} 40.72 ± 0.70	^{Ca} 16.65 ± 0.69	^{Ba} 14.14 ± 0.44
900 W	0.02	^{Aa} 40.04 ± 0.75	^{Ab} 17.49 ± 0.35	^{Ab} 11.78 ± 0.44
	0.04	^{Ab} 43.74 ± 0.11	^{Ac} 15.62 ± 0.04	^{Ac} 17.85 ± 0.05
	0.06	^{Aa} 40.89 ± 0.48	^{Aa} 17.45 ± 0.77	^{Aa} 16.40 ± 1.12

Tabloda aynı sütunda büyük harfle gösterimde farklı harf gücün renk değeri üzerine etkili olduğunu. Farklı küçük harf basıncın renk değeri üzerine etkili olduğunu istatistiksel olarak göstermektedir ($p < 0.05$)

Taze ve kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin kroma (C) renk doygunluğu, Hue açısı (H) ürünün temel rengine karşılık gelen açısı değeri, kahverengileşme indeksi (BI) ile ifade edilirken, kırmızıbiber örneklerinin taze bibere göre kurutmada ki değişimi ise toplam renk değişimi (ΔE) olarak ifade edilmiştir ve Tablo 4'te verilmiştir. Taze örneğin C (21.14); H (37.56); BI (84.97); ΔE (0) olarak bulunmuştur.

Ürünün kroması (C), ürünün canlı yada pastel tonlarıyla ilgili bir kriter olup pastel tonlar 0'a canlı tonlar ise 100'e yakın olarak tanımlanmıştır [26]. Renk doygunluğu olarak etüvde kurutulan kırmızıbiberlerin daha canlı olduğu görülürken. taze bibere en yakın kroma değeri vakum destekli mikrodalga kurutma prosesinde gözlemlenmiştir. Mikrodalga-vakum kurutma prosesinde neredeyse tüm parametreler taze örneğe benzer değerlerde olduğu belirlenmiştir. Mikrodalga prosesinde canlılık ve taze ürüne yakınlık olarak değerlendirildiğinde en iyi kroma değeri 900 W-0.06 MPa vakum destekli mikrodalga gücünde elde edilmiştir. 180 W, 360 W ve 600 W güçte vakumun ve mikrodalga gücünün istatistiksel açıdan renk doygunluğu üzerinde etkisi görülmemiştir. Vakum basıncının kroma değeri üzerinde etkisinin yüksek vakum değeri olan 0.06 MPa renk doygunluğunun yüksek değerde olduğu gözlemlenmiştir. Etüvde kurutulan kırmızıbiber örnekleri taze bibere göre daha yüksek değerlerde olduğu

gözlemlenmiştir. Sıcaklığı değiştirmek kroma değeri üzerinde istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur.

Tablo 4. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin renk değerleri

Güç (W)	Vakum (MPa)	C	H	BI	ΔE				
0.02	Ba	22.25±0.32	Cb	44.43±0.57	Bb	71.22±1.79	Bb	13.45±0.34	
180	0.04	Bb	14.02±0.71	Ca	31.05±0.35	Bc	45.69±1.95	Ba	13.52±0.68
	0.06	Ba	23.06±0.06	Ca	35.45±0.14	Ba	75.34±3.91	Bb	8.68±1.69
0.02	Ba	16.85±0.10	Cb	33.71±0.38	Cb	55.50±0.42	Cb	10.44±0.25	
360	0.04	Bb	17.33±0.55	Ca	37.63±0.62	Cc	58.04±1.37	Ca	10.38±0.55
	0.06	Ba	18.71±1.04	Ca	39.90±1.28	Ca	62.22±2.97	Cb	9.59±0.61
0.02	Ba	19.54±0.37	Bb	40.10±1.96	Cb	63.21±0.51	Bb	9.78±0.72	
600	0.04	Bb	13.58±0.49	Ba	40.65±0.44	Cc	45.92±1.26	Ba	15.35±0.37
	0.06	Ba	21.84±0.80	Ba	40.34±0.45	Ca	70.38±1.33	Bb	10.04±1.26
0.02	Aa	21.09±0.32	Ab	33.96±1.26	Ab	63.86±0.82	Ab	9.75±0.26	
900	0.04	Ab	23.72±0.06	Aa	48.81±0.02	Ac	76.45±0.30	Aa	17.34±0.13
	0.06	Aa	23.97±0.67	Aa	43.20±2.81	Aa	80.04±4.30	Ab	12.61±1.18

Tabloda aynı sütunda büyük harfle gösterimde farklı harf gücün renk değeri üzerine etkili olduğunu, farklı küçük harf basıncın renk değeri üzerine etkili olduğunu istatistiksel olarak göstermektedir (p<0.05).

Hue açısı (H), ürünün temel rengine karşılık gelen açısız ifadedir ve 0° kırmızı, 90° sarı, 180° yeşil ve 270° ise ürünün mavi renkte olduğunu ve bu açı değerlerinin aralarına denk gelen kısımlarda ara renklerin oluştuğu görülmektedir [26]. Kırmızıbiber örnekleri renginden dolayı taze bibere yakın ve 0'a yakın değerlerde olması beklenir. Vakum destekli mikrodalga tekniği ile kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin Hue açısı değeri tüm parametrelerde neredeyse taze bibere yakın değerlerde gözlemlenmiştir. Etüvde kurutulan kırmızıbiber örneklerinin Hue açısı taze bibere göre daha yüksek olduğu ve 90° sarı renge yaklaştığı gözlemlenmiştir. Kırmızıbiber örnekleri Hue açısı yönünden değerlendirildiğinde vakum destekli mikrodalga tekniği etüvde kurutulan numunelere göre daha iyi düzeyde olduğu görülmüştür. Gücü değiştirmek Hue açısı üzerinde etkilidir yorumu yapılabilir.

Kahverengileşme indeksi (BI), kırmızı rengin baskın olduğu gıdalarda genellikle yüksek değerlerde görülmektedir. Düşük olduğu durumlarda ürün renginde açılma/sararma meydana geldiği yorumu yapılabilir [26]. Kırmızıbiber örneklerinde vakum destekli mikrodalga tekniği ile kurutulmuş numunelerin BI değerleri taze ürüne göre düşük değerde olduğu görülmüştür. Taze ürüne en yakın indeks 900 W/0.06 MPa mikrodalga gücünde ve vakum basıncında gözlemlenmiştir. Etüvde kurutulan numuneler ise taze bibere kıyasen yüksek BI değerinde

olması rengin daha koyulaştığı anlamına gelmektedir. 180 W ve 900 W mikrodalga güçlerinde gücü değiştirmek esmerleşme indeksi üzerinde etkilidir. Vakum parametresini değiştirmek BI değeri üzerinde istatistiksel açıdan önemlidir.

Toplam renk değişimi (ΔE), taze kırmızıbiberin ve kurutulmuş numunelerin renk parametrelerinin değişiminin sayısal olarak ifadesidir [26]. Toplam renk değişimi vakum destekli mikrodalga kurutma tekniğinde etüvde kurutulan numunelere göre daha düşük değerde olduğu görülmüştür. Mikrodalga-vakum tekniğinde %8.6-17.3 arasında renk değişimi gözlemlenirken etüvde kurutulan numunelerde %29.7-61.7 arasında toplam renk değişimi görülmüştür.

3.4 Toplam monomerik antosiyanin

Antosiyaninler meyve ve sebzelerin pembe kırmızı ve mor tondaki çeşitli renkleri veren suda çözünabilir renk pigmentleridir [27]. Antosiyaninler ısıya karşı duyarlı fenolik bileşiklerdir. Mikrodalga-vakum yöntemiyle kurutulmuş kırmızıbiber (*Capsicum annuum* L.) örneklerinin toplam monomerik antosiyanin miktarı pH diferansiyel metodu ile ölçülmüştür ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin toplam monomerik antosiyanin değerleri

Güç	Vakum (MPa)	Toplam Monomerik Antosiyanin (mg/kg)
180 W	0.02	Dc 31.05±1.41
	0.04	Db 44.08±5.66
	0.06	Da 58.11±8.50
360 W	0.02	Bc 39.07±4.25
	0.04	Bb 112.21±2.83
	0.06	Ba 150.28±11.33
600 W	0.02	Cc 29.05±1.41
	0.04	Cb 56.10±0.00
	0.06	Ca 111.21±13.00
900 W	0.02	Ac 95.18±6.00
	0.04	Ab 101.19±21.25
	0.06	Aa 175.33±12.75

Tabloda aynı sütunda büyük harfle gösterimde farklı harf gücün toplam monomerik antosiyanin üzerine etkili olduğunu, küçük harf basıncın toplam monomerik antosiyanin üzerine etkili olduğunu istatistiksel olarak göstermektedir (p<0.05).

Toplam monomerik antosiyanin miktarları değerlendirildiğinde vakum destekli mikrodalga prosesinde 29.05-175.33 mg/kg değerlerinde elde edilmiştir. En yüksek monomerik antosiyanin miktarı 900W-0.06 MPa parametrelerinde elde edilmiştir. En düşük antosiyanin miktarı 180 W ve 600 W mikrodalga güçlerinde ve 0.02 MPa vakum gücünde gözlemlenmiştir. Mikrodalga güçlerinde vakumun artmasıyla birlikte antosiyanin miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte etüvde kurutulan ürünlerin antosiyanin miktarında azalma tespit edilmiştir. Sıcaklığın antosiyanin miktarı üzerinde olumsuz etkisi etüvde kurutulan ürünlerde gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra mikrodalga sisteminde vakumun olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin antosiyanin miktarı istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde (Tablo 5), gücün toplam monomerik antosiyanin üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Vakum basıncını değiştirmek

$p < 0.05$ olduğu için istatistiksel açıdan vakumu değiştirmek antosiyanin miktarı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Yapılan bir çalışmada etüvde (60 °C, 70 °C ve 80 °C) kurutulan kırmızıbiber örneklerinin toplam monomerik antosiyanin miktarı 37.07-112.21 mg/kg değerleri arasında değişim göstermiştir. En yüksek antosiyanin miktarı 60 °C kurutma sıcaklığında gözlemlenmiştir. Askorbik asidin ve askorbik asidin parçalanma ürünlerinin bulunduğu ortamlarda antosiyaninlerin daha hızlı parçalandığından söz edilmiştir. Kurutulmuş kırmızıbiberlerde bazı örneklerde az düzeyde antosiyanin miktarı ve miktarlarda dalgalanma görülmesi kırmızıbiberde bulunan askorbik asit düzeyi ile açıklanabilir [24, 28].

3.5 Askorbik asit (C vitamini)

Askorbik asit (C vitamini), suda çözünebilir vitamin olup meyve ve sebzelerde bulunan başlıca vitamin çeşididir. Gıdaların işlenmesi muhafaza edilmesi ile birlikte en fazla kayba uğrayan vitamin C vitamini [24]. Mikrodalga-vakum kurutma tekniği ile kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin C vitamini içeriği 5067.03-10531.97 mg/kg değerleri arasında bulunmuştur (Tablo 6). En yüksek askorbik asit değeri 360 W mikrodalga gücünde olduğu gözlemlenmiştir. En düşük 180 W mikrodalga gücünde elde edilmiştir. Etüvde kurutulan kırmızıbiberlerin askorbik asit değerleri vakum destekli mikrodalga kurutma prosesine göre daha düşük değerlerde elde edilmiştir.

Tablo 6. Kurutulmuş kırmızıbiber örneklerinin toplam askorbik asit değerleri

Güç (W)	Vakum (MPa)	C vitamini (mg/kg)
180 W	0.02	Ba 6005.52±296.72
	0.04	Ba 5268.25±152.90
	0.06	Bb 5067.03±263.72
360 W	0.02	Aa 10531.97±4267.20
	0.04	Aa 8679.01±3560.14
	0.06	Ab 6034±14±1699.09
600 W	0.02	Ba 6746±214.45
	0.04	Ba 6473.68±53.96
	0.06	Bb 5562.89±263.57
900 W	0.02	Ba 6283.02±53.92
	0.04	Ba 6214.82±94.43
	0.06	Bb 5425.06±80.88

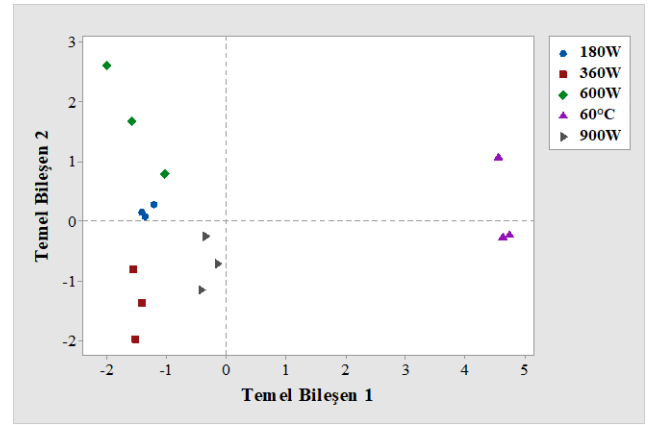
Tabloda aynı sütunda büyük harfle gösterimde farklı harf gücün askorbik asit üzerine etkili olduğunu, farklı küçük harf basıncın askorbik asit üzerine etkili olduğunu istatistiksel olarak göstermektedir ($p < 0.05$).

Etüvde kurutulan kırmızıbiberlerin askorbik asit miktarları 1961.86-2689.76 mg/kg arasında değişiklik göstermektedir. Sıcak havada kurutulan kırmızıbiberler içinde yüksek askorbik asit 60 °C sıcak havada kurutulan örneklerde gözlemlenmiştir. Sıcak hava kurutma tekniğinde, vakum destekli mikrodalga kurutmaya göre düşük askorbik asit içeriği olması yüksek sıcaklığın C vitamini üzerinde etkisi ile açıklanabilirken, vakumun atmosferik koşullar altında daha düşük sıcaklıklarda kuruma sağlamanın avantajı da vakum destekli mikrodalga kurutmada gözlemlenmiştir. Yapılan bir çalışmada kırmızıbiber ve havuç örneklerini sıcak hava, mikrodalga ve sıcak hava-

mikrodalga, sıcak hava-vakum proseslerinde kurutulması sonucu kalite kriterleri incelemiştir. Düşük güç değerlerinde askorbik asit içeriğinin az da olsa korunacağı ifade edilmiştir. Tek başına yüksek güçte kırmızıbiber kurutmanın ve mikrodalga kurutmaya vakum kombine edilmesiyle yapılan kırmızıbiber örneklerinin kurutulmasında biyoaktif bileşenlerin daha fazla korunduğu görülmektedir [29].

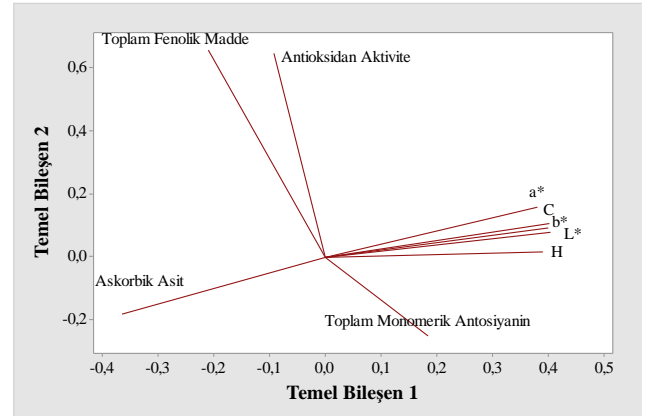
3.6 Temel bileşen analizi (PCA)

Temel bileşen analizi (PCA) skor grafiği (Şekil 2) incelendiğinde örneklerin kurutma yöntemine göre gruplandığı gözlemlenmektedir. Grafik incelendiğinde mikrodalga kurutma yöntemleri ile kurutulan örneklerin sıcak hava kurutma yöntemi ile kurutulan örneklerden temel bileşen 1'e göre farklılaştığı belirlenmiştir. 180 ve 600 W güçte mikrodalgada kurutulan örnekler temel bileşen 2'ye göre 360 W ve 900 W güçte mikrodalgada kurutulan örneklerden ayrılmıştır.



Şekil 2. Temel bileşen analizi (PCA) ile elde edilen skor grafiği

Temel bileşen analizi (PCA) yüklem grafiği (Şekil 3) incelendiğinde mikrodalga fırında kurutma ile elde edilen örnekler toplam fenolik madde, antioksidan aktivite ve askorbik asit değerleriyle karakterize olurken, sıcak hava ile kurutulan örneklerin L^* , a^* , b^* , C, H ve toplam monomerik antosiyanin değerleriyle karakterize olduğu görülmektedir.



Şekil 3 Temel bileşen analizi (PCA) ile elde edilen yüklem grafiği

PCA analizi sonucu elde edilen eigenvalue, varyans ve kümülatif varyans değerleri Tablo 7’de gösterilmektedir. Tabloya göre PCA grafiği toplam varyansın %83’ünü oluşturan iki temel bileşen üzerinde örneklerin dağılımını göstermektedir. Birinci temel bileşen toplam varyansın %67.30’ünü ikinci temel bileşen ise toplam varyansın %15.80’ini açıklamaktadır. Temel bileşenler ile örneklerin fizikokimyasal özellikleri (değişkenler) arasındaki korelasyon katsayısı değerleri Tablo 8’de gösterilmektedir.

Tablo 7. PCA sonuç verileri

	Eigenvalue	Varyans (%)	Kümülatif Varyans (%)
Temel bileşen1 (PC1)	6.0530	0.673	0.673
Temel Bileşen2 (PC2)	1.4210	0.158	0.830

Tablo 8’e göre temel bileşen 1 analiz edilen parametrelerden toplam fenolik madde, antioksidan aktivite ve askorbik asit ile negatif korelasyon gösterirken, diğerleri ile pozitif bir korelasyon göstermiştir. Temel bileşen 2 ise toplam monomerik antosiyanin ve askorbik asit ile negatif bir korelasyon gösterirken diğerleri ile pozitif bir korelasyon göstermiştir.

Tablo 8. Temel bileşenler ile örneklerin fizikokimyasal özellikleri (değişkenler) arasındaki korelasyon katsayısı değerleri

Değişkenler	Temel bileşen 1 (PC1)	Temel Bileşen 2 (PC2)
Toplam fenolik madde	-0.210	0.658
Antioksidan aktivite	-0.091	0.648
Toplam monomerik antosiyanin	0.185	-0.251
Askorbik asit	-0.365	-0.182
L*	0.399	0.094
a*	0.380	0.158
b*	0.403	0.079
C	0.401	0.100
H	0.390	0.015

4 Sonuçlar

Sonuç olarak kurutma sistemine ilaveten kombine sistemler ile doğru yöntemler seçilerek son ürün kalitesinde olumlu etkiler görülmektedir. İyi kalitede son ürün elde edebilmek. Enerjiyi mümkün olduğunca etkin şekilde kullanabilmek. Ürünün piyasa değerine uygun kurutma yöntemi ve parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesiyle mümkün olabilmektedir. Vakum destekli mikrodalga prosesinde elde edilen ürünlerin kimyasal, fiziksel ve kurutma süresi bakımından daha iyi sonuçlar sağladığı ve değişebilen parametreler ile ürüne özgü kurutma planının yapılabilmesi, vakumla birlikte yüksek sıcaklık etkisi ile yanmanın önüne geçilebilmesi ve askorbik asit gibi ısıya duyarlı vitaminlerin korunduğu belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] E. Şen, Sanayi biberinde (*Capsicum annuum* L.) damla sulama uygulamalarının bazı verim ve kalite özellikleri üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, Türkiye, 2015.
- [2] C.L. Gutierrez, D.L.T. Meidna and M.E. Jaramillo-Flores, Pepper and Spice Capsicum. In Handbook of Vegetable Preservation and Processing. 2nd ed. Y.H. Hui. E.E. Özgül, pp. 559-588, CRC Press, Boca Raton. 2016.
- [3] K.D. Scala and G. Grapiste, Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. LWT-Food Sciences, 41, 789-795, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.06.007>.
- [4] H. Vardın ve Ş. Dağhan. Şanlıurfa Biber Tohumu Yağının Yağ Asitleri Kompozisyonu ve Mineral İçeriğinin Belirlenmesi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 4(3), 49-57, 2019.
- [5] S. İnanoğlu, Mikrodalga-vakum kurutma yönteminin adaçayının kalite özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Türkiye, 2017.
- [6] Q. Guo, D.W. Sun, J.H. Cheng and Z. Han, Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. Trends in Food Science & Technology, 67, 236-247, 2017.
- [7] A. Aydogdu, G. Sumnu and S. Sahin, Effects of microwave-infrared combination drying on quality of eggplants. Food and Bioprocess Technology, 8(6), 1198e1210, 2015.
- [8] E. Horuz, H. Bozkurt, H. Karataş and M. Maskan, Drying kinetics of apricot halves in a microwave-hot air hybrid oven. Heat and Mass Transfer, 53, 2117-2157, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-1973-z>.
- [9] A. Nawirska-Olszanka. B. Stephen and A. Biesiada. Effectiveness of the fountain-microwave drying method in some selected pumpkin cultivars. LWT - Food Science and Technology, 77, 276e281, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.067>.
- [10] AOAC. Official Methods of Analysis. 14 Ed.. Association of Official. Donfoss. Nordborg, Denmark, Analytical Chemists, Washington DC, 1984.
- [11] V. L. Singleton, R. Orthofer and R.M, Lamuela-Ravenos, Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, 299, 152-178, 1999.
- [12] M.S. Blois, Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. Nature, 181, 1199-1200, 1958. <https://doi.org/10.1038/1811199a0>.
- [13] B. Cemeroğlu, F. Karadeniz ve M. Özkan, Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, 28, Ankara, 2003.
- [14] F. M. Botelho, P. C. Corrêa, A. Goneli, M. Martins, F. E. Magalhães and S.C. Campos, Periods of constant

- and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15, 845-852, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800012>
- [15] Z.H. Tekin, Biberlerin kurutulmasında kalite özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla ultrason destekli vakum kurutma yönteminin uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [16] Y. Tian, S. Wu, Y. Zhao, Q. Zhang, J. Huang and B. Zheng, Drying characteristics and processing parameters for microwave-vacuum drying of kiwifruit (*Actinidia Deliciosa*) slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39, 2620–2629, 2015. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12512>
- [17] A. Vega-Galvez, K.D. Scala, K. Rodriguez, R. Lemus-Mondaca, M. Miranda, J. Lopez and M. Perez-Won, Effect of air-drying temperature on physicochemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*. L. var. Hungarian). *Journal of Food Chemistry*, 117, 647-653, 2009.
- [18] G. Guclu, D. Keser, H. Kelebek, M. Keskin, Y.E. Sekerli, Y. Soysal and S. Selli, Impact of production and drying methods on the volatile and phenolic characteristics of fresh and powdered sweet red peppers. *Food Chemistry*, 338, 128129, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128129>
- [19] N. D. Mrad, N. Boudhrioua, N. Kechaou, N. Courtois and C. Bonazzi, Influence of air drying temperature on kinetics. physicochemical properties. total phenolic content and ascorbic acid of pears. *Food and bioproducts processing*, 90(3), 433-441, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.11.009>.
- [20] R. Li, H. Shang, H. Wu, M. Wang, M. Duan and J. Yang, Thermal inactivation kinetics and effects of drying methods on the phenolic profile and antioxidant activities of chicory (*Cichorium intybus* L.) leaves. *Scientific reports*, 8(1), 9529, 2018.
- [21] L. Z Deng, X. H. Yang, A.S. Mujumdar, J.H. Zhao, D. Wang, Q. Zhang and H.W. Xiao, Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics. physicochemical properties. antioxidant capacity, and microstructure. *Drying Technology*, 36(8), 893-907, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1361439>.
- [22] A. Michalska, A. Wojdyło, K. Lech, G. Łysiak and A. Figiel, Physicochemical properties of whole fruit/plum powders obtained using different drying technologies. *Food Chemistry*, 207, 223–232, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.075>.
- [23] H.R. Barros, T.A. Ferreira and M.I. Genovese, Antioxidant Capacity and Mineral Content of Pulp and Peel from Commercial Cultivars of Citrus from Brazil. *Food Chemistry*, 134(4), 1892, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.090>
- [24] E. Demiray ve Y. Tulek, Kurutma işleminin kırmızı biberdeki renk maddelerine etkisi. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 1-10, 2012.
- [25] İ. Alibaş, Kırmızı Şili biberinin vakumla kurutma karakteristikleri. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 7(4), 429-435, 2011.
- [26] S. Günaydın, Mikrodalga, konvektif ve gölgede kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuş kuşburnu meyvesinin kurutma kinetiği, renk ve besin elementi içeriği açısından incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2020.
- [27] H. Fersahoğlu, Farklı renklerdeki gülhatmi çiçeklerinin biyoaktif özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2016.
- [28] B. Demir, Design and optimization of microwave oven. Msc Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, Türkiye, 2010.
- [29] E. Demiray ve Y. Tulek, Color degradation kinetics of carrot (*Daucus carota* L.) slices during hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 800-805, 2015. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12290>.





Investigating the influence of machining parameters and tool coatings on surface quality of titanium parts in aerospace industry

Havacılık endüstrisinde titanyum parçaların yüzey kalitesi üzerindeki işleme parametrelerinin ve takım kaplamalarının etkisinin araştırılması

Burak Kaymak¹ , Fahrettin Öztürk^{2,*} 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Mechanical Engineering, 06010, Ankara, Türkiye

² Turkish Aerospace Industries Inc., 06980, Ankara, Türkiye

² Istanbul Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, 34437, İstanbul, Türkiye

Abstract

In the aerospace sector, most titanium components are produced through milling, which poses several challenges in achieving superior surface quality. Consequently, optimizing cutting parameters and choosing appropriate cutting tool coatings are critical factors influencing the surface roughness of these parts. This study examines the impact of depth of cut, cutting speed, and feed rate on surface roughness when milling the Ti-6Al-4V alloy. It also provides an in-depth analysis of three different coatings - Aluminum Chromium Nitride (AlCrN), tungsten-based AlCrN, and tungsten-based Aluminum Titanium Nitride (AlTiN) - in terms of surface quality. The findings reveal that cutting speed is the most significant factor affecting surface roughness in experiments conducted using the Taguchi method, with three values assigned to each parameter. Moreover, the tungsten-based AlCrN coating demonstrated the best average surface roughness values. Overall, this study offers valuable insights into factors affecting surface roughness in titanium milling and presents practical recommendations for selecting cutting parameters and tool coatings to improve surface quality in aerospace parts production. In future research, additional factors such as tool geometry and cooling strategies can also be investigated to further improve surface quality in titanium machining.

Keywords: Ti-6Al-4V, Machining parameters, Milling, Surface roughness, Taguchi method

1 Introduction

Titanium alloys are stand out among engineering materials due to their exceptional balance of lightweight properties and resilience against cracking, as well as superior strength and remarkable resistance to corrosion. These materials have recently had surge in interest interest due to their versatility in the aerospace, biomedical, petrochemical, and automotive industries. Over the years, the aerospace industry has been at the forefront of developing and applying new materials. The current need for reduced fuel

Öz

Havacılık endüstrisinde çoğu titanyum parça frezeleme işlemi kullanılarak üretilir ve yüksek yüzey kalitesinin elde edilmesinde çeşitli zorluklar vardır. Bu nedenle talaşlı imalatta kesme parametrelerinin optimize edilmesi ve kesici takım kaplamalarının seçilmesi parçaların yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının frezeleme sırasında kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri araştırılmıştır. Ayrıca yüzey kalitesine dayalı AlCrN (Alüminyum Krom Nitrid), AlCrN-tungsten bazlı ve AlTiN (Alüminyum Titanyum Nitrid)-tungsten bazlı olmak üzere üç farklı kaplama derinlemesine incelenmektedir. Taguchi yöntemi kullanılarak her parametre için üç değer belirlenerek yapılan deneylerde sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin kesme hızı olduğunu göstermektedir. Ayrıca AlCrN-tungsten bazlı Ayrıca tungsten bazlı AlCrN kaplama en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini göstermiştir. Genel olarak bu çalışma, titanyum frezelemede yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler hakkında değerli bilgiler vermekte ve havacılık parçaları üretiminde yüzey kalitesini iyileştirmek için kesme parametrelerinin ve takım kaplamalarının seçilmesine yönelik pratik öneriler sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalarda, titanyum işlemede yüzey kalitesini daha da artırmak için takım geometrisi ve soğutma stratejileri gibi ek faktörler de araştırılabilir.

Anahtar kelimeler: Ti-6Al-4V, İşleme parametreleri, Frezeleme, Yüzey pürüzlülüğü, Taguchi yöntemi

consumption and high manufacturing standards is pushing aerospace engineering to create materials that can endure extreme conditions, offer significant weight reduction, and possess good machinability. The properties of aerospace materials are meticulously tailored to specific applications. Titanium alloys show exceptional resistance to corrosion and superior strength-to-weight ratio when compared to most steels and aluminum. This explains their growing prevalence in modern aerospace: they can withstand higher temperatures than aluminum alloys while boasting a weight advantage over most steels [1-4]. While titanium alloys boast

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fahrettin71@gmail.com (F. Öztürk)

Geliş / Received: 31.07.2024 Kabul / Accepted: 08.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1525630

widespread use and impressive properties, their machinability presents a significant challenge. Unlike many other metals, they are notoriously difficult to machine due to inherent material characteristics. These challenges include low thermal conductivity, which traps heat and accelerates tool wear; low modulus of elasticity, leading to vibrations and reduced tool life; and high chemical reactivity, causing adhesion and further wear. Consequently, machining titanium alloys results in high cutting temperatures, rapid tool wear, and significant vibrations.

Over the past few decades, research has focused on developing new cutting tool materials, improving existing tool designs, and conducting extensive machinability studies. These efforts aim to identify the optimal combination of cutting tools, machine tools, and cutting parameters to address the significant challenges in machining titanium alloys. [5-9].

The machining process significantly affects the surface quality properties of titanium alloy workpieces. Various machining phenomena, such as build-up edge formation (BUE), tool shape and geometry, tool wear, temperature, tool coating, feed rate, cutting speed, and depth of cut, greatly influence the surface quality of titanium components. The primary causes of these effects during machining include thermo-mechanical cycling, microstructural alterations, and mechanical and thermal deformations. [5].

Ünal and Karaca [10] examined various cutting parameters, including different feed rates, cutting speeds, and depths of cut, for Ti-6Al-4V on a vertical machining center CNC machine. They investigated the effects of these parameters on chip type, surface roughness, and surface microhardness. Their experiments revealed that surface roughness increased with higher feed rates and cutting speeds. Generally, they observed the formation of continuous spinning and saw tooth cross-section chips. Ezugwu et al. [6] explored the use of cubic boron nitride (CBN) tools, commonly used for machining hard alloys like hardened high chromium steels and nickel alloys, for turning Ti-6Al-4V alloys. The study assessed the machinability performance of the Ti-6Al-4V alloy at various cutting speeds with different grades of CBN tools under diverse cooling applications. They evaluated tool wear, cutting and feed force, tool life, and surface roughness to determine the cutting tools' performance. The study observed excessive shedding and notches on the cutting edges, attributed to the diffusion wear mechanism.

Ensaroğlu and Çakir [11] investigated the influence of various machining parameters, such as feed rate, cutting tool type, depth of cut, cutting speed, and coolants/lubricants, on the machinability of titanium alloys. Their study also analyzed wear mechanisms, surface roughness, and chip formation specific to these alloys. They found that cutting speed has the most significant impact on tool life, although it can improve productivity and surface finish. This finding suggests that prioritizing cutting speed can enhance production efficiency in titanium machining, despite the trade-off of increased tool wear and potentially rougher surfaces compared to using slower speeds and higher feed rates.

Palanisamy et al. [12] investigated the impact of high-pressure coolant on chip formation during the turning of Ti-6Al-4V alloy. Their research revealed significant improvements in both tool life and surface roughness when high-pressure coolant was employed. Additionally, they explored the effect of coolant pressure on chip morphology, observing that varying coolant pressures significantly altered the thickness, shape, and microstructure of the machined chips.

Fierce competition compels manufacturers to prioritize product quality to survive and expand market share. Consequently, they employ various quality improvement methods. However, these methods often involve numerous parameters, leading to high costs and lengthy experimentation times. To address these challenges, Genichi Taguchi pioneered the use of orthogonal arrays in the 1940s. The Taguchi method offers a powerful approach to reduce experiment time and associated costs. It achieves this by strategically dividing the quality system into pre-production and production phases. Notably, the method emphasizes that product quality and customer satisfaction are strongly influenced by a well-designed and developed product, highlighting the importance of upfront planning and engineering [13, 14].

Cutting parameters are critical factors that vary depending on the material being processed and the cutting tool used, and they hold the most significant influence on the final surface finish. Optimizing these parameters is crucial for achieving the desired surface roughness. This study aims to investigate the effect of machining parameters, such as cutting speed, depth of cut, feed rate, and various cutter coating types, on the surface roughness of the titanium alloy Ti-6Al-4V during milling operations, an area not extensively covered in the literature.

A review of existing literature reveals a focus on lathe machining for studying surface roughness in Ti-6Al-4V. However, the aerospace industry relies heavily on milling to manufacture structural parts. This highlights a gap in research – there's a need for more investigations into how milling parameters affect surface roughness in this crucial material. Furthermore, existing milling studies often concentrate on dry or cryogenic cutting conditions. Since surface roughness directly impacts the reliability and lifespan of high-precision aerospace components, exploring a wider range of milling parameters, including cutting fluids and tool coatings, is essential for optimizing surface quality.

2 Material and method

This study utilizes Ti-6Al-4V, an alpha-beta titanium alloy. For reference, the chemical composition and mechanical properties of the alloy are detailed in Tables 1 and 2, respectively.

Table 1. Chemical compositions of Ti-6Al-4V (weight %)

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
5.5-6.75	3.5-4.5	3.5-4.5	<0.25	<0.08	<0.05	<0.01	<0.2

Experiments were carried out using DMG MORI ecoMill 800V 3-axis CNC machine in Skymark Aviation

Technologies company. The power of the machine is 13 kW, the speed of the machine is 12000 rpm, and dimensions of the machine are 800 x 560 x 510 mm. The CNC vertical machine was used in the experiment as indicated in Figure 1(a). Cutting tool and stock with 35 x 76 x 110 mm dimensions were used as shown in Figure 1(b).

Table 2. Physical and mechanical properties of Ti-6Al-4V

Parameter	Value
Density (kg/m ³)	4430
Melting point (°C)	1668
Thermal conductivity (W/m/°C)	7.3
Ultimate strength (MPa)	950
Specific heat (J/(kg/°C))	526
Yield strength (MPa)	820
Young's modulus (GPa)	113.8
Poisson's ratio	0.342



Figure 1. (a) EcoMill 800V 3-axis CNC machine (b) stock used in experiments (c) cutting tool used in experiments

In the experiments, 27 pieces of tools with the code 111416010 and a 16 mm diameter which were supplied from Karcan Cutting Tools, were used under wet condition. They have a coating layer consisting of AlCrN (Aluminum Chromium Nitride), AlCrN-tungsten based coating, and AlTiN (Aluminum Titanium Nitride)-tungsten based coating. Brand new tools were used in each experiment to keep everything at same condition. Schematic view of cutting tool shown in Figure 1(c) and the technical specifications are given in Table 3.

Table 3. Tool designation

Parameter	Value
Tool Code	111416010
Cutter Diameter (d1h9)	16 mm
Shank Diameter (d2h6)	16 mm
Overall Length (L1)	93 mm
Length of Cut (L2)	36 mm
Radius (R)	1 mm
Flute Number	4

The surface roughness that occurred as a result of the machining processes was measured with the Mitutoyo SJ-210 surface roughness measuring device. The tip radius of the profilometer needle is 2 μm and 60° tip angle is

measured. The force is 0.75 mN and the scanning speeds are chosen 0.25, 0.5, and 0.75 mm/s respectively.

The tool designation, and requirements for the Ti-6Al-4V alloy lead to the investigating parameters given in Table 4.

Table 4. Experimental parameters

Process parameters	Range		
Cutting Speed	60 m/min	70 m/min	75 m/min
Feed Rate	0.02 mm/tooth	0.025 mm/tooth	0.03 mm/tooth
Depth of Cut	3 mm	3.5 mm	4 mm

First, CAM programs were prepared using the Siemens NX program, with the experimental sequences in the Taguchi method. Since tool wear is one of the important factors affect the test results due to surface roughness, a brand-new tool was used for each experiment. Due to the dimensions of the stock and the diameter of the tool used, experiments could not be completed on a single surface of the raw material. Therefore, both surfaces of the stock were used for experiments. While 5 experiments were carried out on one surface of the test sample, the remaining 4 experiments were completed on the other surface. After the first 5 experiments were completed, the CNC machine was stopped for the other 4 experiments and the stock was removed from the clamp used. The stock was turned upside down and placed in the clamp and was tightly tied to the clamp with the help of a plastic hammer. The experiment was completed by restarting the CNC machine and running the remaining 4 CAM programs. Every step is repeated for other experiments. After the completed experiments, the test sample was removed from the CNC machine for surface roughness measurement.

Surface roughness measurements were made through the machining direction of the cutting tool and at the inlet and outlet areas of the cutting tool into the stock which is shown in Figure 2. Measurements were made from the lateral surface of the inlet and outlet areas. The test results were found by averaging the different roughness values measured for each test.

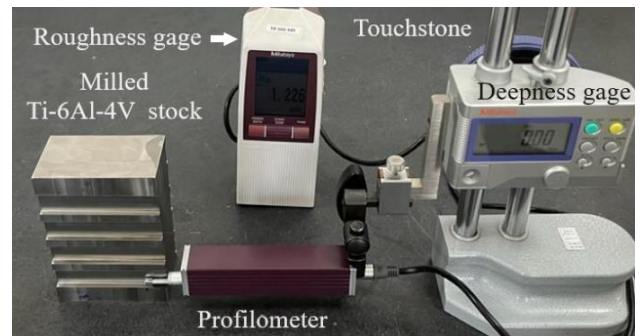


Figure 2. Surface roughness measurement on test specimen

2.1 Taguchi method

The Taguchi method is used as a valuable tool for identifying optimal configurations among various levels of multiple variables. It excels in optimizing design parameters by strategically planning the experimental design. This method offers a significant advantage: it reduces the number

of required experiments compared to a traditional approach where every combination of variable levels is tested. The Taguchi method achieves this efficiency by utilizing orthogonal array tables, which allow for the evaluation of a wide range of factors with a minimal number of experiments. [15]. One of the key strengths of the Taguchi method lies in its use of orthogonal arrays. These arrays enable researchers to simultaneously evaluate all levels of each factor within a limited number of experiments. This eliminates the need for time-consuming, one-factor-at-a-time testing. This efficiency is a major reason why the Taguchi method has become widely adopted in the manufacturing sector. [16, 17]. The main purpose of the Taguchi method is to design products or processes that are insensitive to all combinations of uncontrollable factors while controllable variables are time and cost efficient at certain levels. On the other hand, the main purpose of the Taguchi experimental design is to achieve the desired quality values of the products and to complete the process of obtaining this quality with a much lower number of experiments and costs [18]. To evaluate performance within the Taguchi method, researchers utilize a specific set of statistical criteria known as signal-to-noise (S/N) ratios. These ratios are measured in decibels (dB) and provide a metric for assessing the impact of noise factors (uncontrollable variables) on the desired signal (product or process characteristic). Notably, Taguchi categorized practical problems into three types based on the target outcome, and assigned a corresponding S/N ratio formula for each category [19, 20].

A minimization problem is the case where the value of Y is zero is the “smallest is best” case. In this case, the signal-to-noise ratio is defined as in Equation (1).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{u=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$

where “Y” indicates the performance characteristic value. i is the experimental number. n is the number of trials for experiment i. u is the trial number. Similarly, a maximization problem, the “biggest is best” case, becomes the inverse of the “smallest best” case. Its S/N ratio is obtained by Equation (2).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2)$$

Another situation is that in the “Target value is best” case, the target value is given for Y, such as the product dimensions, and in this case the equation is as in Equation (3).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{Y^2}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

where σ^2 represents the variance where σ is the standard deviation [16-18].

A cornerstone of the Taguchi method is the use of orthogonal arrays, also known as design matrices. These

arrays offer a powerful approach for efficiently designing experiments involving multiple factors. Their key advantage lies in enabling the simultaneous evaluation of different factor levels, minimizing the number of required tests. The Taguchi categorized orthogonal arrays into various types based on the number of levels involved (typically 2 or 3), as indicated in Equation (4).

$$L_d(a)^k \quad (4)$$

where L is orthogonal arrays, d is total experiment numbers, a is stage numbers of factors, and k is the factor number. Generally used 2-level arrays are L_4, L_8, L_{16} while 3-level arrays are L_9, L_{18}, L_{27} arrays. When selecting the arrays, the number of levels and total degrees of freedom are considered. The $L_9(3)^3$ design matrix is given in the Table 5.

Table 5. Orthogonal arrays in L_9 type

Experiment Number	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Thanks to orthogonal arrays, the number of experiments that need to be done as required by the full factorial design is greatly reduced. According to the full factorial design, $(3)^3(27)$ different experiments are required for this example, while 9 experiments are sufficient by help of the orthogonal arrays.

The Taguchi L_9 orthogonal array was chosen as the most suitable design for the experiment to examine the effect of process parameters on surface roughness, considering the variables. Table 6 shows the placement of the determined experimental factors and levels in the Taguchi L_9 orthogonal array.

Table 6. Control factors and levels

Symbols	Parameters	Control factors and levels		
		Level 1	Level 2	Level 3
A	Cutting speed (m/min)	60	70	75
B	Feed rate (mm/tooth)	0.02	0.025	0.03
C	Depth of cut (mm)	3	3.5	4

The Taguchi L_9 orthogonal arrays was chosen as the most suitable design for the experiment to be conducted to examine the effect of process parameters on the surface roughness, considering the variables. Table 6 shows the placement of the determined experimental factors and levels

in the Taguchi L_9 orthogonal array. The selected experimental conditions were repeated 2 times and get averaged to increase the reliability of the results.

The 9 experiments are designed as in Table 7.

Table 7. The placement of the determined experimental factors and levels

Experiment Number	Variables	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
1	A1B1C1	1	1	1
2	A1B2C2	1	2	2
3	A1B3C3	1	3	3
4	A2B1C2	2	1	2
5	A2B2C3	2	2	3
6	A2B3C1	2	3	1
7	A3B1C3	3	1	3
8	A3B2C1	3	2	1
9	A3B3C2	3	3	2

The parameters corresponding to Table 7 is shown explicitly in Table 8.

Table 8. Experiment factors and L_9 orthogonal arrays

Experiment No	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/tooth)	Depth of Cut (mm)
1	60	0.02	3
2	60	0.025	3.5
3	60	0.03	4
4	70	0.02	3.5
5	70	0.025	4
6	70	0.03	3
7	75	0.02	4
8	75	0.025	3
9	75	0.03	3.5

3 Results and discussion

This study examines the impact of milling parameters on the surface roughness of Ti-6Al-4V alloy. The research uses the Taguchi L_9 orthogonal array to optimize cutting speed, depth of cut, and feed rate, while evaluating three different cutting tool coatings. Each parameter was assessed at three levels. Milling experiments were performed according to the Taguchi design, and the resulting surface roughness was measured.

Subsequently, Taguchi optimization techniques were applied to the experimental data to identify the parameter combination yielding the minimal surface roughness. Additionally, an Analysis of Variance (ANOVA) was performed to determine the relative impact of each parameter on the surface roughness of milled titanium. Minitab 20 and MATLAB software were utilized for data analysis.

Building on the average surface roughness values measured from the experiments, the signal-to-noise (S/N) ratios were calculated using Equation (1) – presented earlier – following a "smaller-the-better" approach (as explained previously). For instance, the average surface roughness for the AlCrN coated tools was 1.01 micrometers, resulting in an S/N ratio of 0.35 dB. Table 9 presents all calculated S/N ratios.

The average value of the surface roughness for the AlCrN-tungsten based coating obtained as a result of the milling experiments was calculated as 0.831 μm . Similarly, the average value of S/N ratios was calculated as 1.66 dB.

The average value of the surface roughness for AlTiN-tungsten based coating obtained as a result of the milling experiments was calculated as 0.866 μm . Similarly, the average value of S/N ratios was calculated as 1.33 dB.

The Taguchi S/N response tables, detailed in Tables 9-11, were analyzed to assess the influence of each milling parameter on surface roughness. These tables reveal the optimal parameter settings that achieve minimal surface roughness. Notably, cutting speed emerged as the most significant parameter impacting surface quality, followed by feeding rate and cutting depth, in that order. ANOVA confirmed these findings.

Table 9. Experiment results and S/N ratios for the AlCrN coating

Experiment No	A	B	C	Ra (μm)	S/N ratio (dB)
1	60	0.02	3	0.565	4.959031
2	60	0.025	3.5	0.586	4.642048
3	60	0.03	4	0.974	0.228821
4	70	0.02	3.5	1.130	-1.06157
5	70	0.025	4	0.862	1.289855
6	70	0.03	3	0.887	1.041528
7	75	0.02	4	1.203	-1.60531
8	75	0.025	3	1.299	-2.27218
9	75	0.03	3.5	1.591	-4.0334

Table 10. Experiment results and S/N ratios for the AlCrN-tungsten based coating

Experiment No	A	B	C	Ra (μm)	S/N ratio (dB)
1	60	0.02	3	0.720	2.85335
2	60	0.025	3.5	0.680	3.349822
3	60	0.03	4	0.753	2.4641
4	70	0.02	3.5	0.913	0.790584
5	70	0.025	4	0.840	1.51441
6	70	0.03	3	0.816	1.76620
7	75	0.02	4	0.916	0.762091
8	75	0.025	3	0.825	1.670921
9	75	0.03	3.5	1.023	-0.19751

Table 11. Experiment results and S/N ratios for the AlTiN-tungsten based coating

Experiment No	A	B	C	Ra (μm)	S/N ratio (dB)
1	60	0.02	3	0.831	1.60798
2	60	0.025	3.5	0.764	2.33813
3	60	0.03	4	0.853	1.38102
4	70	0.02	3.5	0.813	1.79819
5	70	0.025	4	0.713	2.93821
6	70	0.03	3	0.756	2.42956
7	75	0.02	4	0.989	0.09607
8	75	0.025	3	0.923	0.69597
9	75	0.03	3.5	1.158	-1.27417

On the other hand, the graphics showing the level values of the parameter factors for the surface roughness values are given in Figure 3-5, respectively, where "smaller is the best" was aimed.

The optima are given in Table 12-14.

The optimal levels for each control factor are identified by analyzing the signal-to-noise (S/N) ratio across all levels of that factor. For milling Ti-6Al-4V alloy, the best levels and their corresponding S/N ratios were determined as follows: cutting speed at level 1 with an S/N ratio of 3.27663, feed rate at level 2 with an S/N ratio of 1.21991, and depth of cut at level 1 with an S/N ratio of 1.24279. In other words,

the optimal surface roughness for Ti-6Al-4V was achieved with a cutting speed of 60 m/min, a feed rate of 0.025 mm/tooth, and a cutting depth of 3 mm.

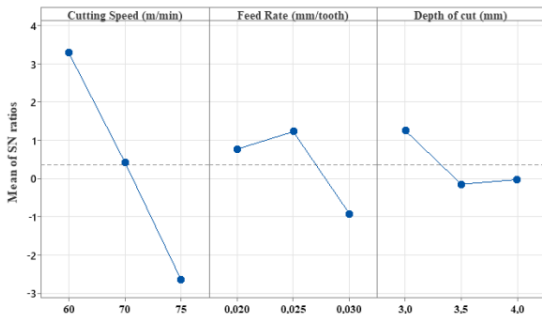


Figure 3. Local sensitivities in the parameters in the case of the AlCrN coating

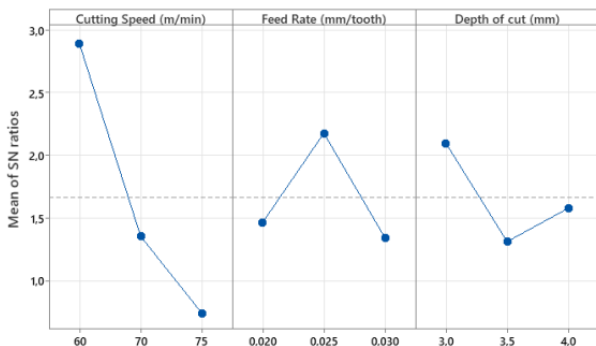


Figure 4. Local sensitivities in the parameters in the case of the AlCrN-tungsten based coating

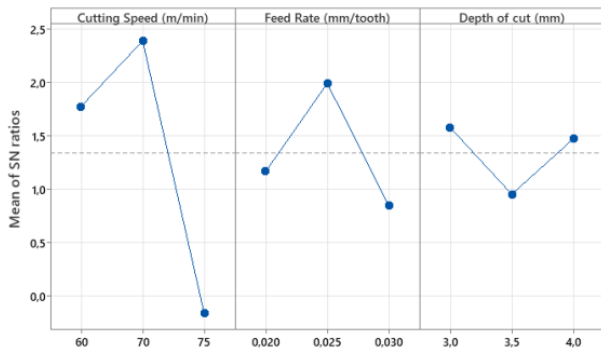


Figure 5. Local sensitivities in the parameters in the case of the AlTiN-tungsten based coating

Table 12. Response table for signal to noise ratios for the AlCrN coating

Level	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/tooth)	Depth of Cut (mm)
1	3.27663	0.76405	1.24279
2	0.42327	1.21991	-0.15097
3	-2.63697	-0.92102	-0.02888
Delta	5.91360	2.14092	1.39377
Rank	1	2	3

The optimal level for each control factor is determined by analyzing the signal-to-noise (S/N) ratio for all levels of that factor. For milling Ti-6Al-4V alloy, the best levels and

their corresponding S/N ratios were found to be: cutting speed at level 1 with an S/N ratio of 2.8891, feed rate at level 2 with an S/N ratio of 2.1784, and depth of cut at level 1 with an S/N ratio of 2.0968. This means that the optimum surface roughness for Ti-6Al-4V was achieved with a cutting speed of 60 m/min, a feed rate of 0.025 mm/tooth, and a cutting depth of 3 mm. This result aligns with the findings for the first tool coating.

Table 13. Response table for signal to noise ratios for the AlCrN-tungsten based coating

Level	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/tooth)	Depth of Cut (mm)
1	2.8891	1.4687	2.0968
2	1.3571	2.1784	1.3143
3	0.7452	1.3443	1.5802
Delta	2.1439	0.8341	0.7825
Rank	1	2	3

Table 14. Response table for signal to noise ratios for the AlTiN-tungsten based coating

Level	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/tooth)	Depth of Cut (mm)
1	1.7757	1.1674	1.5778
2	2.3887	1.9908	0.9541
3	-0.1607	0.8455	1.4718
Delta	2.5494	1.1453	0.6238
Rank	1	2	3

The optimal level for each control factor is identified by examining the signal-to-noise (S/N) ratio for all levels of that factor. For milling Ti-6Al-4V alloy, the best levels and their corresponding S/N ratios were found to be: cutting speed at level 2 with an S/N ratio of 2.3887, feed rate at level 2 with an S/N ratio of 1.9908, and depth of cut at level 1 with an S/N ratio of 1.5778. Thus, the optimum surface roughness for Ti-6Al-4V was achieved with a cutting speed of 70 m/min, a feed rate of 0.025 mm/tooth, and a cutting depth of 3 mm. Additionally, compared to the results from the first two experiments, the third coating performed better at higher cutting speeds. An Analysis of Variance (ANOVA) was conducted to assess the influence of control factors and their interactions on surface roughness during Ti-6Al-4V alloy milling. The results, presented in Table 15, were obtained at a 95% confidence level. F-values and percentage impact rates within the table indicate the relative importance of each factor, with the factor having the highest F-value exerting the strongest effect on surface roughness.

Table 15. The ANOVA results for surface roughness

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value
Feed Rate (mm/tooth)	2	0.09186	10.33%	0.09186	0.04593	1.04
Cutting Speed (m/min)	2	0.65726	73.94%	0.65726	0.32863	7.45
Depth of cut (mm)	2	0.05154	5.80%	0.05154	0.02577	0.58
Error	2	0.08819	9.92%	0.08819	0.04410	
Total	8	0.88886	100.00%			

The ANOVA analysis of the first experiment revealed cutting speed as the most dominant factor affecting surface roughness, contributing 73.94% to the variation. Feed rate followed in significance with a 10.94% impact, while depth of cut had the least influence (5.8%). Given the primacy of cutting speed, further analysis focused on its interaction with feed and depth of cut, visualized through graphs. Notably, similar trends were observed in experiments with different tool coatings. These coatings, while not altering the relative importance of cutting speed, feed rate, and depth of cut, did influence the overall surface roughness and optimal parameter values. This study aligns with findings from Yusuf et al. [21] who identified cutting speed as the primary factor impacting surface roughness in titanium alloys, followed by feed rate. However, contrasting results were reported by Riberio et al. [22] where radial depth of cut emerged as the most influential parameter. Krishnaraj, V. et al. [23] investigating high-speed end milling of titanium observed minimal influence of feed rate on surface roughness, aligning with the dominance of cutting speed observed here. Their findings, however, suggest depth of cut might hold a greater significance compared to this study.

Figure 6(a, b) illustrates the impact of cutting speed and feed rate on surface roughness. The graph shows that as cutting speed increases, surface roughness also rises. Ünal and Karaca [10] stated according to their experiments with increasing cutting speed, surface roughness also tends to increase. As the cutting speed increases, scratches with larger pitch occur on the surface. The size of these scratches significantly increases the surface roughness. Since increasing cutting speed and increasing cutting forces and cutting temperatures can be considered as factors that accelerate tool wear, increasing cutting speed can be associated with increasing surface roughness.

The analysis indicates a positive correlation between feed rate and surface roughness. As feed rate increases, the chip cross-sectional area grows proportionally. This translates to a larger slip plane area within the primary deformation zone, demanding more energy for chip removal. Higher feed rates also lead to elevated cutting temperatures due to the increased volume of material being machined per unit time. The additional energy required to overcome these factors manifests as increased surface roughness. Furthermore, increased feed rates necessitate greater cutting forces, which themselves contribute to a rougher surface finish. Ramesh et al. [24], employed different machining parameters for a titanium alloy and utilized ANOVA to analyze their findings. While they anticipated an influence of feed rate on the results, it is well-established within machining literature that conventional surface roughness, for a specific tool tip radius, is inherently linked to feed rate.

Figure 6(a, b) reveals an interesting interaction between cutting speed and feed rate in their influence on surface roughness. As cutting speed increases, the sensitivity of surface roughness to variations in feed rate also intensifies. Conversely, at moderate cutting speeds, changes in feed rate have a less pronounced effect on surface roughness. When selecting cutting parameters based on these two factors,

prioritizing the values that yielded the minimal surface roughness, as identified in the graphs, is recommended.

Figure 6(c, d) depicts the effect of cutting depth on surface roughness in conjunction with cutting speed. The data indicate that increasing the depth of cut results in a rise in surface roughness. This increase can be attributed to the well-documented influence of machining vibrations or chatter on surface finish. [22]. A greater depth of cut translates to increased cutting forces, which can induce vibrations in the cutting tool. Consequently, the rise in surface roughness observed with increasing depth of cut is likely linked to these amplified cutting forces.

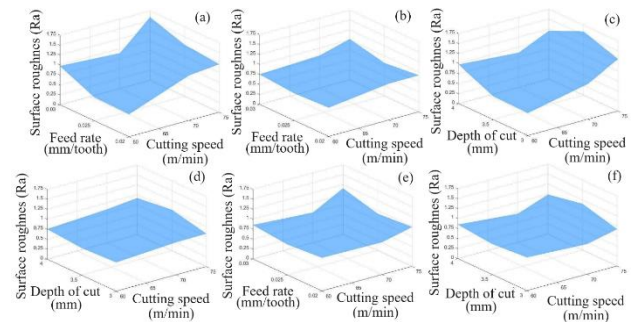


Figure 6. The effects of the parameters on surface roughness for (a) the AlCrN coating, (b) the AlCrN-tungsten based coating, (c) the AlCrN coating, (d) the AlCrN-tungsten based coating, (e) AlTiN-tungsten based coating, (f) AlTiN-tungsten based coating

Figure 6(c, d) unveils a complex interaction between cutting speed and depth of cut regarding their influence on surface roughness. Contrary to a monotonic rise, the impact of increasing depth of cut on surface roughness intensifies at higher cutting speeds. Here, an interesting trend emerges: while surface roughness initially increases with depth of cut, it can exhibit a decline beyond a specific threshold. This improvement in surface quality can be attributed to the interplay between cutting forces and temperature. High cutting forces, associated with larger depths of cut, also elevate temperatures within the cutting zone. This thermal increase may induce softening of the machined material, facilitating easier machining. This phenomenon likely explains the observed reduction in surface roughness at high cutting speeds and significant depth of cut values. When selecting cutting parameters based on these factors, prioritizing the values that yielded the minimal surface roughness, as identified in the graphs, remains crucial.

In Kara's study [25] conducted, the experimental results with values such as cutting speed, feed rate, and depth of cut were analysed with the help of the ANOVA, and it was revealed that the most used parameter that affected the experimental results the least was the depth of cut. It can be said that the reason why depth of cut is the least affecting parameter in this study is that the depth of cut values used in both studies are low enough to be used in finish surface operations. This result matches many studies in the literature [20,24].

Figure 6(e) shows that the increase in cutting speed increased the surface roughness at high cutting speeds, while it was close to each other at low and average cutting speeds. This shows that the coating is durable up to a certain cutting speed, but after that tool wear occurs and influences surface roughness. At high feed rates, the surface roughness decreased while the cutting speed was average. According to the result in the graph, it can be said that the third coating is relatively resistant to cutting temperatures, but the surface roughness increases at high cutting and high feed values due to the further increase in temperature. The values should not be chosen too high to reach low values in surface quality.

According to the conclusion drawn from the graph in Figure 6(e); as the effect of feed rate on surface roughness increases with increasing cutting speed, especially at high cutting speed. At average cutting speed values with using the AlTiN-tungsten based coating, the effect of feed rate on surface roughness does not change very much. Liang et al. [26] found that in their study, the lowest surface roughness value was found by using the AlTiN-tungsten based coating and this coating is suitable for micro machining of titanium.

Figure 6(f) shows that the cutting speed increases, the effect of cutting depth on surface roughness also increases. It is concluded from the graph that the decrease in surface roughness at high depth of cut, average and high cutting speed values may be due to thermal softening with increasing temperature value. The effect of depth of cut increases with increasing cutting speed. The high surface roughness value due to the depth of cut can be attributed to the forces and vibration on the tool. Compared to the AlCrN coating, the AlTiN-tungsten based coating seems to be more suitable for deep cutting at average cutting speeds. However, it would be better to choose lower depths of cut as the vibration of the tool mentioned earlier is one of the factors affecting tool life.

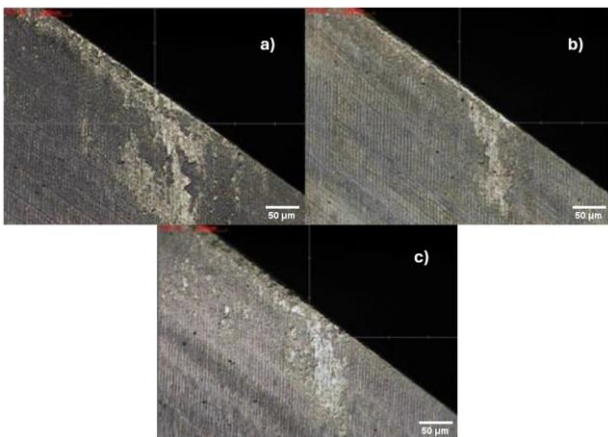


Figure 7. Coating wear at different coating types a) AlCrN (Aluminum Chromium Nitride), b) AlCrN-tungsten based, c) AlTiN (Aluminum Titanium Nitride)-tungsten based

Figure 7 shows the coating wear in the cutting zone for different coatings. The tools in the images are taken from experiments with high surface roughness for each experimental setup. When the images are examined, it seems that the coating adhesion can be attributed to the temperature

increase at high cutting speed values and insufficient cooling. Coating adhesion and wear were observed on the tool surface. Since the experiments in which the tool samples were taken were all carried out at high cutting speed, the result is consistent with the experiments. It is necessary to reduce the temperature in the cutting zone to reduce coating wear. Therefore, the temperature in the cutting zone is reduced, the coating adhesion becomes lower, the higher the tool life can be achieved. It is a challenging subject that the lower the costs and the lower the surface roughness value, which should not be ignored when machining titanium materials.

4 Conclusion

In this study, the effects of various cutting parameters and various coating types on surface roughness were investigated using the Taguchi orthogonal array. The following results were drawn:

- The most important parameter affecting surface roughness was found to be cutting speed based on the Taguchi test results. The second important parameter was the feed rate, and the less affecting parameter was the depth of cut.
- The lowest surface roughness was obtained from the experiment number 1 with a value of $0.565 \mu\text{m}$. The highest surface roughness was obtained from the experiment number 9 with a value of $1.591 \mu\text{m}$.
- The AlCrN-tungsten based coating has the best average of all surface roughness's.
- Optimum values were found for the AlTiN-tungsten based coating with slightly higher cutting speed. It can be said that it is more durable than the other coatings tested.
- According to ANOVA results for the AlCrN, the contribution of cutting speed, which is the most important parameter affecting surface roughness, was found to be 73.94%. The result is similar for the other coatings.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 16

References

- [1] M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert and C. Leyens, Structure and properties of titanium and titanium alloys, Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, 1-36, 2003. <https://doi.org/10.1002/3527602119.ch1>
- [2] I. Inagaki, T. Takechi, Y. Shirai and N. Ariyasu, Application and features of titanium for the aerospace industry, Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, 106, 22-27, 2014.
- [3] R.R. Boyer, An overview on the use of titanium in the aerospace industry, Materials Science and Engineering: A, 213(1-2), 103-114, 1996. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10233-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1)
- [4] A. Gomez-Gallegos, P. Mandal, D. Gonzalez, N. Zuelli and P. Blackwell, Studies on titanium alloys for

- aerospace application, Defect and Diffusion Forum, Trans Tech Publications, 419-423, 2018. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.385.419>
- [5] J.P. Davim, Machining of hard materials, Springer Science & Business Media, 2011.
- [6] E. Ezugwu and Z. Wang, Titanium alloys and their machinability—a review, Journal of Materials Processing Technology, 68(3), 262-274, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00030-1)
- [7] H. Hong, A. Riga, J. Gahoon and C. Scott, Machinability of steels and titanium alloys under lubrication, Wear, 162, 34-39, 1993. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90481-Z](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90481-Z).
- [8] C. Ohkubo, I. Watanabe, J. Ford, H. Nakajima, T. Hosoi and T. Okabe, The machinability of cast titanium and Ti-6Al-4V, Biomaterials, 21(4), 421-428, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(99\)00206-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(99)00206-9).
- [9] M. Rahman, Y. San WONG, A.R. Zareena, Machinability of titanium alloys, JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 46(1), 107-115, 2003. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.107>.
- [10] C. Ensarioğlu, M.C. Çakır, Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü-Bölüm I, Mühendis ve Makina, 46(546), 36-46, 2005.
- [11] S. Palanisamy, S.D. McDonald and M.S. Dargusch, Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(9), 739-743, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.02.010>
- [12] R.K. Roy, A primer on the Taguchi method, Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [13] I. Tlhabadira, I.A. Daniyan, L. Masu and L.R. VanStaden, Process design and optimization of surface roughness during M200 TS milling process using the Taguchi method, Procedia Cirp, 84, 868-873, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.200>
- [14] A. Freddi, M. Salmon, A. Freddi and M. Salmon, Introduction to the Taguchi method, Design Principles and Methodologies: from Conceptualization to First Prototyping with Examples and Case Studies, 159-180, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95342-7_7
- [15] S.K. Karna and R. Sahai, An overview on Taguchi method, International Journal of Engineering And Mathematical Sciences, 1(1), 1-7, 2012.
- [16] M. Saravi, L.B. Newnes, A.R. Mileham, Y.M. Goh and K. Morton, Using Taguchi method to optimise performance and product cost at the conceptual stage of design, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227(9), 1360-1372, 2013. <https://doi.org/10.1177/0954405413488361>
- [17] J.J. Pignatiello Jr, An overview of the strategy and tactics of Taguchi, IIE transactions, 20(3), 47-254, 1988. <https://doi.org/10.1080/07408178808966177>
- [18] T.B. Barker, Engineering quality by design: interpreting the Taguchi approach, CRC Press, 1990.
- [19] T.R. Bement, Taguchi techniques for quality engineering, Taylor & Francis, 1989. <https://doi.org/10.1080/00401706.1989.10488519>
- [20] K. Yusuf, Y. Nukman, T. Yusof, S. Dawal, H. Qin Yang, T. Mahlia and K. Tamrin, Effect of cutting parameters on the surface roughness of titanium alloys using end milling process, Scientific Research and Essays, 5(11), 1284-1293, 2010.
- [21] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo and D. Figueiredo, Optimization of cutting parameters to minimize the surface roughness in the end milling process using the Taguchi method, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 61(1), 30-35, 2017. <https://doi.org/10.3311/PPme.9114>
- [22] V. Krishnaraj, S. Samsudeensadham, R. Sindhumathi and P. Kuppan, A study on high speed end milling of titanium alloy, Procedia Engineering, 97, 251-257, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.248>
- [23] E. Ünal ve F. Karaca, Ti-6Al-4V alaşımının dik işlem merkezli CNC tezgahında işlenebilirliğinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 6(1), 135-139, 2007.
- [24] S. Ramesh, L. Karunamoorthy and K. Palanikumar, Surface roughness analysis in machining of titanium alloy, Materials and Manufacturing Processes, 23(2), 174-181, 2008. <https://doi.org/10.1080/10426910701774700>
- [25] V. Kara, Taguchi metodu yardımıyla, GS 24Mn5 N malzemenin frezeleme operasyonunda, işleme parametrelerinin yüzey kalitesine etkisinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2012.
- [26] Z. Liang, P. Gao, X. Wang, S. Li, T. Zhou and J. Xiang, Cutting performance of different coated micro end mills in machining of Ti-6Al-4V, Micromachines, 9(11), 568, 2018. <https://doi.org/10.3390/mi9110568>





Sülfürleme süresinin sulu çözelti karışımı ile hazırlanan Cu_2SnS_3 ince filmlerin özellikleri üzerine etkisi

Effect of sulfurization time on the properties of Cu_2SnS_3 thin films prepared with aqueous solution mixture

Sevde Erkan^{1,*}, Yavuz Atasoy², Mehmet Ali Olğar³, Recep Zan⁴

^{1,3,4} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fizik Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

^{1,2,3,4} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde, Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Zübeyde Hanım Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, 51200, Niğde, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, basit ve çevre dostu sulu bir öncül karışım kullanılarak Cu_2SnS_3 (CTS) ince filmleri dönel kaplama sisteminde üretilmiştir. 2- metoksietanol -saf su çözeltisi kullanılarak hızlı tavlama fırınında büyütülen CTS ince filmlerinde sülfürleme süresinin yapısal, optik ve elektrik özellikleri üzerine etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. 525°C'de 60s, 180s ve 300s bekleme sürelerinde üretilen CTS ince filmlerin, Cu-zengini stokiyometriye sahip olduğu ve monoklinik fazda kristalleştiği Enerji Dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile tespit edilmiştir. X ışını kırınımı (XRD) analizleri ile hesaplanan parametrelere göre, 35.6 nm kristal boyutuna sahip CTS-180 örneğinin diğer numunelere kıyasla daha düşük dislokasyon yoğunluğuna ve mikro gerinime sahip olduğu, dolayısı ile daha yüksek kalitede kristalleştiği tespit edilmiştir. Raman analizleri, XRD sonuçlarında ortaya çıkan CTS monoklinik fazı ve ikincil faz oluşumlarını desteklemektedir. Diğer taraftan, örneklerin Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ile yüzey görüntüleri incelendiğinde sülfürleme süresinin filmlerin yüzey morfolojisini değiştirdiği belirlenmiştir. Sülfürleme süresinin artması ile homojen dağılımlı kompakt yüzey görüntülerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Yapılan optik soğurma ölçümleri ile örneklerin yasak enerji bant aralığı değerlerinin 1.01-1.10 eV arasında olduğu belirlenmiş, bu değerlerin aynı zamanda CTS'nin monoklinik fazına atfedilmiştir. CTS-180 örneğinin diğerlerine göre daha yüksek taşıyıcı yoğunluğuna ve daha düşük özdirence sahip olduğu belirlenmiş olup, tüm karakterizasyon sonuçlarına göre CTS-180 örneğinin güneş hücre uygulamaları için uygun yapısal, morfolojik optik ve elektrik özellikler sergilediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: CTS ince film, Dönel kaplama, Sülfürleme süresi, Su bazlı çözelti

1 Giriş

Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen ve temiz teknolojik yaklaşım olarak gösterilen fotovoltaik (PV) teknolojisi günümüzde yoğun olarak çalışılan bir araştırma alanıdır. Silikon tabanlı PV'lerin yanı sıra, Bakır

Abstract

In this study, Cu_2SnS_3 (CTS) thin films were produced using a simple and environmentally friendly aqueous precursor mixture in a spin coating system. The effects of sulfurization time on the structural, optical, and electrical properties of CTS thin films grown in a rapid thermal annealing furnace using a 2-methoxyethanol-pure water solution were examined in detail. Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX) revealed that CTS thin films produced at 525°C with holding times of 60 s, 180 s, and 300 s have Cu-rich stoichiometry and crystallize in the monoclinic phase. According to the parameters calculated from X-ray diffraction (XRD) analyses, it was determined that the CTS-180 sample with a crystal size of 35.6 nm has lower dislocation density and microstrain compared to other samples, thus exhibiting higher quality crystallization. Raman analyses support the CTS monoclinic phase and secondary phase formations that emerged in the XRD results. On the other hand, when the surface images of the samples were examined using Scanning Electron Microscopy (SEM), it was determined that the sulfurization time changed the surface morphology of the films. It was observed that with the increase in sulfurization time, homogeneously distributed compact surface images were obtained. Through optical absorption measurements, it was determined that the band gap values of the samples were between 1.01-1.10 eV, which is also attributed to the monoclinic phase of CTS. It was found that the CTS-180 sample had a higher carrier density and lower resistivity compared to the others. According to all characterization results, it was concluded that the CTS-180 sample exhibited suitable structural, morphological, optical, and electrical properties for solar cell applications.

Keywords: CTS thin film, Spin coating, Sulfurization time, Water-based solution

İndiyum Galyum Selenyum (CIGS), Kadmiyum Tellür (CdTe) gibi malzemeler, fotovoltaik endüstrisinde kullanılan güneş hücreleri piyasasının temelini oluşturan olgun teknolojiler olarak gösterilmektedir. Ancak Silisyum güneş hücre maliyetlerinin yüksek olması, In (İndiyum) ve Ga (Galyum)'un doğada az bulunması ve Cd (Kadmiyum)'nin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sevde1253@hotmail.com (S. Erkan)

Geliş / Received: 13.09.2024 Kabul / Accepted: 12.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1549548

toksik olması bu teknolojilere önemli dezavantajlar getirmektedir. Araştırma grupları doğada bol bulunan aynı zamanda çevre dostu elementler içeren alternatif güneş hücre teknolojilerine yönelmişlerdir. Bu anlamda, Cu_2ZnSnS_4 (CZTS), $Cu_2ZnSnSe_4$ (CZTSe) dördü ve $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ beşli bileşiklerinin yüksek hücre performans potansiyelleri nedeniyle yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [1]. Bunlar arasında kesterit fazda kristalleşen CZTS bileşiği, 1.4-1.5 eV optik bant aralığına sahip olması, p-tipi iletkenlik göstermesi ve $>10^4 \text{ cm}^{-1}$ gibi yüksek soğurma katsayısına olması gibi üstün [2] opto-elektronik özellikler sergilemektedir. CZTS tabanlı güneş hücresinden elde edilen dönüşüm verimliliği %15,2 ye ulaşmasına rağmen içerdiği element sayısındaki fazlalığa bağlı olarak ikincil fazlardan arındırılmış tek bir kesterit fazının elde edilmesindeki zorluklar ortaya çıkmaktadır. Sahip olduğu karmaşık yapıdan dolayı CZTS fazının sentezlenmesindeki zorluklar göz önüne alındığında, I-IV-VI grup yarıiletkenlerden oluşan, daha basit yapı, üçlü Cu_2SnS_3 (CTS) kalkojen bileşiği [3]. CZTS ince filmlerin yerini alabilecek potansiyel bir aday olarak gösterilmiştir. Göreceli sadeliği sayesinde, istenmeyen çinko sülfür (ZnS) fazı ve bakır/çinko (Cu/Zn) yapısal düzensizliklerin oluşma ihtimali önemli ölçüde azaltılmaktadır [4]. Ayrıca, CTS'nin p-tipi yarı iletkenlik göstermesi, değişken bant aralıklı olabilmesi (0.9-1.6 eV), yüksek mobilite ve optik soğurma katsayısına ($>10^4 \text{ cm}^{-1}$) sahip olması gibi özellikler sergilemesi, bu yarı iletken malzemenin özellikle güneş hücreleri ve diğer optoelektronik teknolojilerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır [5]. Ek olarak, kristal yapı anlamında incelendiğinde, CTS'nin monoklinik fazının daha düzenli katyon atom dizilimine sahip olmasından dolayı güneş hücresi uygulamalarında tercih edilmektedir [8]. Shockley-Queisser'in teorik hesaplamalarına göre CTS soğurma katmanı kullanılarak üretilecek hücrelerden elde edilebilecek teorik güneş hücresi verim yaklaşık %32 olabileceği bilinmektedir [6]. Ancak, yapılan çalışmalarda CTS ince film tabanlı güneş hücresinden elde edilen en yüksek verim değeri %6.73'tür [7]. Teorik ve deneysel verim değerleri arasındaki uçurumun, Cu/Sn stokiyometrik oranlarındaki sapmalar, üretim yöntemi ve ideal olmayan üretim koşulları gibi birçok değişkenden kaynakladığı düşünülmektedir [12].

CTS ince filmlerinin üretiminde çeşitli fiziksel ve kimyasal teknikler kullanılmaktadır. Bunlar arasında kimyasal banyo biriktirme [9], püskürtme [10], sprey piroliz [11], sıralı iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) [12], termal buharlaştırma darbeleri lazer biriktirme (PLD) [13], elektro depolama [14] ve dönel kaplama (spin coating) [15] gibi birçok farklı yöntemle biriktirebilir. Fiziksel yöntemle üretilen ince filmler yüksek saflıkta film oluşturma, homojenlik ve kalınlık kontrolü kolaylığı açısından avantaj sağlarken vakum ortamı gerekliliği enerji tüketimini arttırmakta dolayısı ile üretim maliyetini yükseltmektedir.

Kimyasal yöntemlerin ince filmlerin üretiminde düşük maliyet ve hızlı üretim imkânı tanınmaktadır [16]. Ayrıca kimyasal yöntemlerle üretimin en önemli faydalarından biri bu yöntemin daha kontrollü ve tekrarlanabilir bir şekilde ince film sentezlenmesine olanak sağlamasıdır. Geniş alanlara

uygulanabilirliği ve vakum gerektirmeyen düşük sıcaklıklarda çalışabilme olanağı sağladığı için CTS ince film soğurma katmanının büyütülmesinde önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir [17, 18]. Sol-gel ince film üretim yöntemleri içerisinde yer alan dönel kaplama yöntemi çözelti tabanlı yöntemler arasında en çok tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir. Dönel kaplama yöntemi kullanılarak nanometreden mikrometreye kadar değişen kalınlıklarda filmler kolaylıkla elde edilebilir. Bu yöntem ekonomik ve kolay erişilebilir yöntemlerden biri olup hem organik hem de inorganik malzemelerle solüsyon hazırlanarak istenilen kalınlıklarda ve alanlarda ince filmler kaplamaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, dönel kaplama yöntemi ile üretilen CZTS tabanlı ince film güneş hücrelerinden %12,6 gibi yüksek bir verim elde edilmesi, bu yöntemin CTS üretiminde kullanılabilirliğini göstermektedir [19]. Bu anlamda, Cho ve ark. [20] tarafından, dönel kaplama yöntemi ile üretilen katkısız CTS ince filmi güneş hücresinde yaklaşık %3 hücre verimi elde edilmiş olup, kimyasal yöntem ile yapılan çalışmaların hücre verimliliği açısından umut vaat ettiği söylenebilir. Sülfürleme sıcaklığı, süresi, ön tavlama işlemi, kimyasal kaynak ve çözücü türü gibi birçok parametrenin hücre performansı üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu bir gerçektir. Bu anlamda kimyasal çözücülerin CTS ince film kalitesini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiş olup, organik (alkol ve türevleri) ve inorganik (su vs.) gibi birçok çözücünün CTS ince film üretimi için kullanıldığı bilinmektedir. Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde Dias ve ark. [21] metal bazlı kaynakları 2-metoksietanol içinde çözerek ürettikleri CTS ince filminin üstün yapısal ve optik özellikler sergilediğini göstermişler ve CTS'nin güneş hücrelerinde ve diğer optoelektronik cihazlarda potansiyel kullanımını rapor etmişlerdir. Başka bir çalışmada ise Sayed ve ark. [24] basit ve çevre dostu olarak nitelenen su bazlı çözücü ile kimyasal sprey piroliz yöntemi kullanarak ürettikleri CTS ince filmlerinde, su bazlı çözücünün yapısal, morfolojik ve fotovoltajik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. CTS soğurma katmanlarının, boşluksuz ve ince taneli yapıdan oluşan bir morfoloji sergilediğini ve cihaz performansını iyileştirdiği bildirilmiştir. CTS ince film üretiminde organik veya inorganik tabanlı birçok çözücünün ayrı ayrı kullanıldığı rapor edilmişken, farklı çözücülerin farklı oranlarda bir araya getirilmesi ile oluşan karışım halindeki çözücülerin etkilerinin tartışıldığına ilişkin sınırlı sayıda çalışma olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, Suryawanshi ve ark. [22] yaptığı bir çalışmada çözelti içerisinde saf su / etanol (5:1) karışımı ile monoetanolamin katkısı kullanılarak dönel kaplama sisteminde güneş hücre uygulamaları için istenilen kalınlıklarda (yaklaşık 1.4 μm) CTS öncü filmleri elde edilmiştir. Karışım formunda kullanılan çözücünün tane yapısını ve kristal kalitesini iyileştirdiği, çözücü içerisindeki suyun boşluksuz bir mikroyapılı morfolojinin oluşumunu desteklediği değerlendirilirken, çözücü tercihinin hücre performansı üzerine önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bouaziz ve ark. [23] yaptığı başka bir çalışmada CTS ince filmler maliyeti düşük ve kolay uygulanabilir yöntemlerden püskürtme (spray pyrolysis) yöntemi ile sulu bir çözelti (su

ve metanol karışımı) püskürtülerek cam yüzeyler üzerine ardışık olarak biriktirilip ardından kükürt atmosferi altında bir ısıtma işlemi ile tavlama işlemi ile ince filmler büyütülmüştür. Yapısal, morfolojik ve optik özellikler incelenmiştir. Malzemenin p-tipi olduğu, tanelerin tercihen (111) Cu_2SnS_3 'e yönlendirildiği ve kübik bir yapıda kristalleştiği bulunmuştur. Ayrıca ince filmlerin yüksek bir absorpsiyon gösterdiği ve yaklaşık 1.15 eV'lik bir doğrudan geçiş boşluğu sergilediği gösterilmiştir.

Yukarıda özetlendiği üzere çözücü türünün ve karışımlarının CTS ince film özellikleri üzerine önemli etkilere sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan çözücü olarak kullanılan saf suyun basit, çevre dostu, ucuz, güvenli ve ölçeklenebilir üretimi destekleyen bir öncül çözücü olmasının yanı sıra hızlı buharlaşma ile özellikle boşluksuz yüzey morfolojisi oluşumu ve tane büyümesini desteklediği rapor edilmiştir. Özellikle saf suyun çözücü olarak PV uygulamalarında kullanılabilirliği ortaya koyulurken, 2-metoksietanol çözücüsünün üstün yapısal ve optik özellikler sergileyen CTS ince filmlerin elde edilebileceği, dolayısı ile CTS tabanlı yüksek hücre performanslı güneş hücrelerin oluşturma potansiyeli olduğu tespit edilmiştir. CTS üretiminde 2- metoksietanol ve saf su çözücülerin ayrı ayrı kullanımının avantajları bahsedilmiş, benzer bir bakış açısı ile farklı çözücülerin beraber kullanımının CTS soğurma katmanların özellikleri üzerine pozitif etkileri ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Ancak, bilinen literatür dahilinde 2-metoksietanol -saf sudan oluşan ikili çözeltinin kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Literatürden farklı olarak 2 metoksietanol-saf su karışımından elde edilen bir çözücü ile hazırlanan ve elde edilen sulu karışımı kullanılarak hazırlanan CTS ince filmler dönele kaplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen ince filmlerin sülfürleme süresinin etkisinin araştırıldığı bu çalışmanın literatüre yenilik katma potansiyeline sahip olduğu düşünülmekte olup, bu anlamda sülfürleme süresinin ikili çözelti ile üretilen CTS ince filmlerin bazı yapısal, optik ve elektrik özellikleri üzerine etkileri detaylı bir şekilde araştırıldı. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, üretilen CTS ince filmlerin güneş hücresine uygulamalarında kullanılma potansiyeli olduğu bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

2 Materyal ve metod

2.1 CTS ince filmlerin üretilmesi

İlk olarak CTS filminin büyütüldüğü cam altlıklara standart temizlik işlemi uygulanmıştır. Cam altlıklar 1.5cm x1.5cm olarak kesilmiş ve daha sonra altlıklar sırasıyla 10 dakika aseton, 10 dakika izopropil alkol (IPA), 10 dakika saf su olmak üzere ultrasonik banyo cihazında içerisinde titreştirildikten sonra N_2 gazı ile kurutulmuştur. Dönele kaplamada kullanılan öncül elementler bakır (II) klorür dihidrat ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$ - 1.2mmol/l), kalay (II) klorür dihidrat ($SnCl_2 \cdot 2H_2O$ - 0.6mmol/l) ve tiyoüre (H_2NCSNH_2 - 2.5mmol/l) olup, bu öncüller 10 mL 2-metoksietanolde-saf su karışımı (4:1) içerisinde çözündürülmüştür. Hazırlanan çözelti, berrak ve homojen bir hale gelinceye kadar iki saat boyunca 50°C'de karıştırılmıştır. Daha sonra homojen bir çözelti elde etmek için damla damla etanolamin eklenerek pH 8'de tutulmuş ve çözelti oda koşullarında yaklaşık 12 saat

boyunca ağzı kapalı bir şekilde manyetik karıştırıcıyla karıştırılmıştır. Kaplama için hazır olan öncül çözeltisi temizlik adımları uygulanmış cam altlıklar üzerine dinamik yöntem ile dönele kaplama sistemi ile kaplanmıştır. Bu yöntemin ilk adımında altlığa damlatılan çözelti 500 rpm gibi düşük bir hızda 20 s boyunca döndürüldükten sonra kaplama işlemi 3500 rpm yüksek hızda 50 s süreyle döndürülerek tamamlanmıştır. Organik çözücü kalıntısını ortadan kaldırmak için 250°C de 10 dk. süreyle oda koşullarında sıcak tabla üzerinde kurutma işlemi gerçekleştirilmiş sonrasında Dektak profilometre kullanılarak kalınlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

İnce film kalınlığı yaklaşık 1,3 μm olana kadar bu işlem birkaç kez tekrarlanmıştır. Kalınlığı optimize edilen CTS ince filmler devamında hızlı tavlama sisteminde (Rapid Thermal Processing -RTP) tavlammıştır. Bu işlem için öncül katman yapıları ile beraber 10 mg toz formda sülfür kapalı grafit bir kutu içerisine yerleştirilmiş, daha sonra öncül katmanlar 525°C'de farklı bekleme süreleri (60 s, 180 s ve 300 s) kullanılarak Ar (%95) + H_2 (%5) atmosferinde sülfürlenmiştir. Tüm sülfürleme işlemlerinde RTP sistemi 1 °C/s'lik hızla ısıtılmıştır.

Farklı bekleme sürelerinde sülfürlenerek üretilen CTS örneklerinin atomik kompozisyonları Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX); yapısal özellikleri, X-ışını Difraktometresi (XRD-PANalytical-EMPYREAN instrument) ve Raman spektroskopisi (Renishaw inVia Spectrometer) analizleri ile belirlenmiştir. Bu analizler kullanılarak kristal yapının oluşup oluşmadığı, ikincil fazların varlığı ve kristal kalitesi araştırılmıştır. Üretilen CTS filmlerin yüzeyi Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiş, böylece tavlama süresinin filmlerin morfolojik özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. CTS filmlerinin optik geçirgenlikleri, Spektroskopik Elipsometre ile ve öz dirençleri, taşıyıcı konsantrasyonları gibi temel elektriksel parametreleri Hall Etkisi ölçümleri ile belirlenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 CTS ince filmlerin yapısal özellikleri

3.1.1 Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi analizi (EDX)

Tablo 1'de ikili çözücü karışımın çözelti tabanlı büyütülen CTS ince filmlere ait elementlerin atomik yüzdeleri ve oranları verilmiştir.

Tablo 1. Farklı bekleme sürelerinde sülfürlenen CTS numunelerin EDX ölçümleri

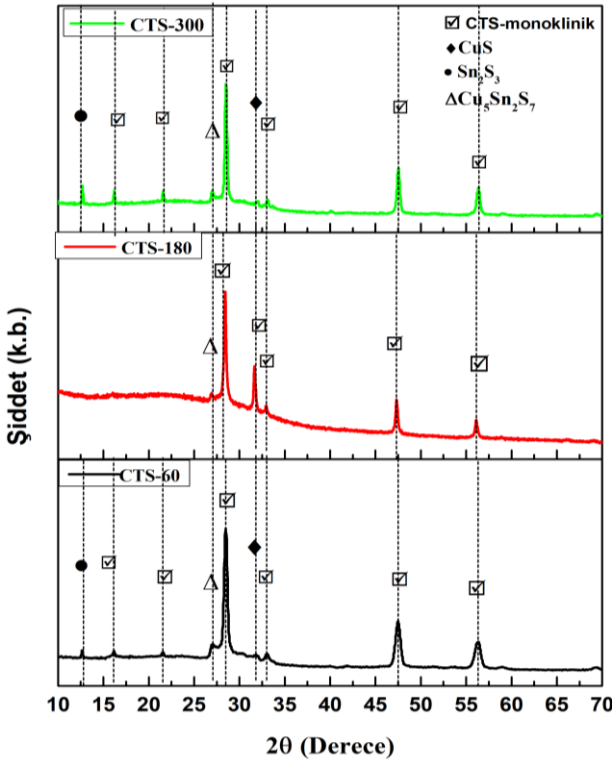
Örnek	Atomik Yüzde (%)			Atomik Oran	
	Cu	Sn	S	Cu/Sn	S/(Cu+Sn)
CTS-60	39.7	15.6	44.7	2.54	0.81
CTS-180	37.8	15.6	46.6	2.42	0.87
CTS-300	39.7	15.7	44.6	2.52	0.81

Bu tablodan görüldüğü üzere, tavlama sıcaklığından bağımsız olarak filmlerin Cu/Sn oranının 2'nin üzerinde yani Cu-zengini (Cu-rich) yapıda olduğu görülmüştür. 525 °C 'lik bir sıcaklıkta, kalayın kısmen yapıdan uzaklaştığı ve bu eksikliğin Cu açısından zengin bir duruma neden olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, S/(Cu+Sn) oranı tüm numuneler

için yaklaşık olarak 0.8-0.9 aralığındadır. Geniş alanda alınan (100x100µm²) ölçüm sonuçlarına göre, Cu ve Sn atomik oranların büyük ölçüde değişmediği, elementel olarak homojen film dağılımının sağlandığı tespit edildi. Bu durum özellikle yüksek bekleme süresinde üretilen örneklerin SEM ölçümleri ile desteklenmektedir.

3.1.2 X-Işınım kırınım analizi (XRD)

Sülfürleme süresinin CTS ince filmlerin kristal yapısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla alınan XRD spektrumları Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, 525 °C'de 60, 180 ve 300 s boyunca tavlanan filmlerin tamamının CTS monoklinik fazında kristalleştiği ve bu faza ait belirgin kırınım piklerinin oluştuğu gözlenmiştir. Analiz sonucunda CTS-60, CTS-180 ve CTS-300 örnekleri için şiddetli ana pikin 2θ= 28,50° civarında oluştuğu, karakteristik diğer piklerin 2θ=16.05°, 33.05°, 47.50°, 56.35°, 59.00°, 69.30°, 76.65°, 79.00° civarında meydana geldiği gözlemlenmiştir (JCPDS- 00-019-0412).



Şekil 1. Farklı sürelerde sülfürlenen CTS ince filmlerin XRD desenleri

Ayrıca, CTS-60 ve CTS-300'de 2θ=12,65° konumunda bulunan Sn₂S₃ (JCPDS -01-072-0031) ile 2θ=31.75° konumunda bulunan CuS (JCPDS 01 -78-0876) ikincil fazları tespit edilmiştir Sülfürleme süresine bakılmaksızın tüm örneklerde 26.95° konumuna ait olan ve Cu zengini olarak nitelendirilen Cu₅Sn₂S₇ fazının ortaya çıktığı görüldü. CTS-180 örneğinde kısmen daha düşük şiddette oluşan bu fazın, EDX sonuçlarında belirlenmiş olan Cu-zengini yapı ile uyum içerisinde olduğu belirlendi. CTS-180 de ikincil fazlardan arındırılmış tek bir minimal ikincil faz Cu₅Sn₂S₇ ile CTS monoklinik fazı elde edilmiştir. CTS-60 da var olan

ikincil fazların oluşumu, tek faz oluşması için yeterli sürenin olmaması ile ilişkilendirilebilirken, CTS-300 içinse bu durum faz ayrışımına atfedilebilir. Üretim koşulları çerçevesinde, iki farklı çözücü karışımı ile üretilen en ideal örneğin CTS-180 olduğu tespit edildi.

İnce filmlerin ortalama kristalit (D) boyutu Denklem (1)'de sunulan Debye Scherrer formülü kullanılarak hesaplanmıştır [25].

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Burada β(radyan), yarı maksimum yoğunlukta ölçülen kırınım çizgisinin genişlemesidir, λ = 1.5406 Å (X-ışını kaynak radyasyonunun dalga boyu) ve θ Bragg açısıdır. Burada k, SEM fotoğraflarında görüldüğü üzere küresel tane yapıları için 0.94 değerinde olduğu varsayılan kristalitlerin şekil faktörüdür. Williamson ve Smallman'ın (W_S) yöntemini kullanarak mikrogerinim (ε) ve dislokasyon yoğunluğu (δ) dahil olmak üzere diğer yapısal parametreleri hesaplamak için sırasıyla Denklem (2) ve (3) kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4} \quad (2)$$

Dislokasyon yoğunluğu ise aşağıdaki Denklem (3) ile belirlenmiştir.

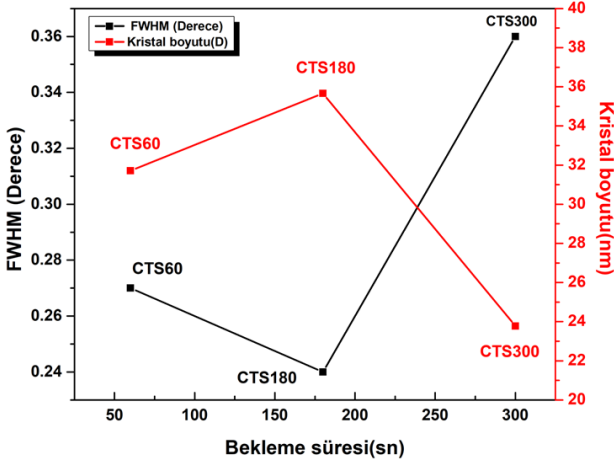
$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemler yardımıyla hesaplanan CTS örnekleri için ortalama kristalit boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikro gerinim değerleri Tablo 2'de verildi.

Tablo 2. CTS ince filmlerin kimyasal bileşimini ortaya koymaya yönelik elementlerin atomik konsantrasyonu ve oranları

Örnek	FWHM β (°)	D (nm)	δ (10 ⁻⁴) (nm ⁻²)	ε (10 ⁻³)
CTS-60	0.36	23.7	17.68	1.52
CTS-180	0.24	35.6	7.86	1.01
CTS-300	0.27	31.7	9.95	1.14

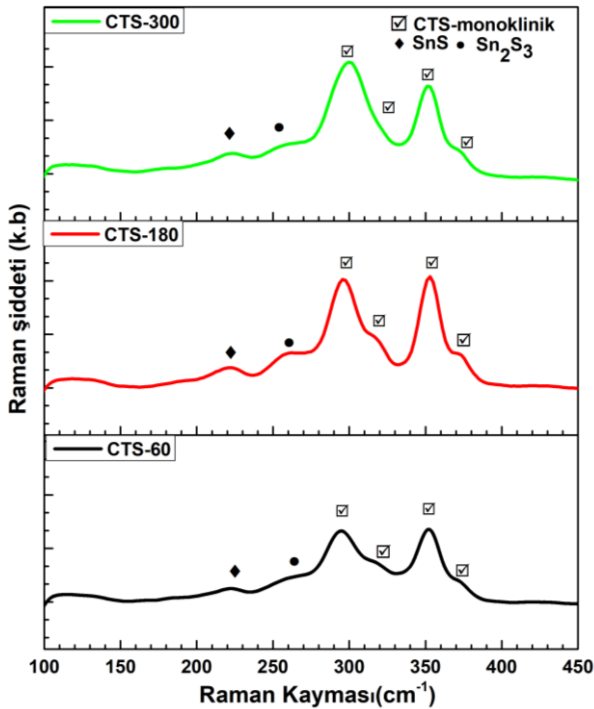
Şekil 2'de görüldüğü kristallenmenin bir ölçüsü olarak gösterilen FWHM değerindeki değişim ile kristal boyutundaki şekillenmenin birbiri ile ters olduğu görülmüştür. Grafikten, D değerinin CTS-60 için en küçük değere sahip olduğu, bekleme süresinin artması ile maksimum değeri olan 35,6 nm'ye ulaştığı ve tekrar azalma eğilimine girdiği görüldü. Diğer taraftan ince filmdeki kusur ve tuzak oluşumlarına karşılık gelen dislokasyon yoğunluğu ve mikro gerinim parametrelerinin CTS-180 örneği için minimum değerde olduğu tespit edilmiştir. Kristal yapıdaki bozunmanın göstergeleri olarak gösterilen bu parametrelere ve kristalit boyut değerlendirmesine göre CTS-180 örneğinin en iyi yapıda kristalleştiği tespit edilmiş olup, bu durumun CTS örneklerinin kristalleşme, ikincil faz analizleri ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. Farklı sürelerde süflürlenen CTS ince filmlerin FWHM-D grafiğı

3.1.3 RAMAN spektroskopisi analizleri

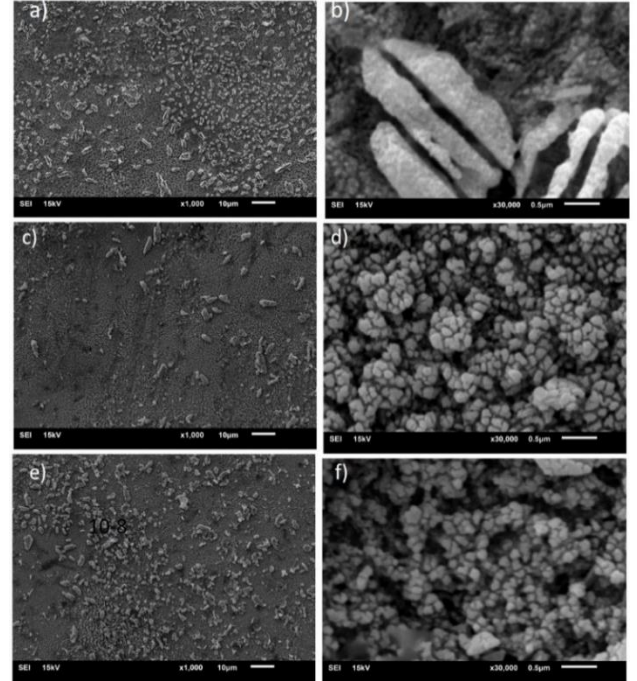
525 °C süflürleme sıcaklığında, 1 °C/s sıcaklık çıkış hızı kullanılarak 60 s, 180 s ve 300 s bekletme sürelerinde süflürlenerek üretilen CTS ince filmlere ait Raman spektrumları Şekil 3'te verilmiştir. CTS'ye ait monoklinik yapının Raman pikleri 220 cm⁻¹, 295 cm⁻¹, 317 cm⁻¹, 353 cm⁻¹ ve 373 cm⁻¹ konumlarında belirlenmiştir [26]. Ayrıca ikincil faz olarak 260 cm⁻¹'de Sn₂S₃ zayıf bir bant gösterdiği, bu faz önceden rapor edilen çalışmalarla ve XRD analizleri ile desteklenmektedir [27]. Ancak, XRD analizlerinde ortaya çıkan CuS fazının Raman ölçümlerinde kullanılan lazerin girme derinliğinin düşük olmasına bağlı olarak Raman ölçümlerinde tespit edilemediği, buna bağlı olarak bu fazın yüzeyden içeride film boyunca oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 3. CTS-60, CTS-180, CTS-300 ait ince filmlerin Raman spektrumları

3.1.4 Taramalı elektron mikroskopu analizleri (SEM)

Farklı büyütme oranlarında (1.000x ve 30.000x) alınan örneklere ait SEM görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, bekletme süresinin yüzey morfolojisi ve tane yapısında önemli değişikliklere neden olduğu görülmektedir. CTS-60 örneğinde alt ince taneli üstte ise mikron boyutlarına ulaşan büyüklükte tanelerden oluşan homojen dağılım sergilemeyen iki katmanlı bir yapının oluştuğu, bu yapıya ait görüntüye yakından bakıldığında ise kısmi boşlukların ortaya çıktığı görülmektedir. Ancak CTS-180 ve CTS-300 de daha homojen ve boşluksuz yüzey görüntüleri elde edilmiştir. SEM analizleri ile numunelerin süflürleme sürelerinin artışı ile tane boyutunda bir artış olduğunu ortaya konmuştur. Süflürleme süresinin arttırıldığı CTS-180 örneğinde ise, belirtilen iki katmanlı yapının kısmen kaybolduğu, mikron altı boyutlu taneli, boşluksuz, yoğun ve homojen dağılıma sahip bir morfolojinin oluştuğu görülmüştür. Bilindiği üzere, güneş hücresi olarak kullanılan soğurma katmanlı yapıların delik veya boşluklu olması kısa devreye neden olmakta, bu da hücre performansını olumsuz etkilemektedir [28]. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda güneş hücresi uygulaması için en uygun yüzey morfolojinin CTS-180 örneğine ait olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Farklı büyütmelerde (1.000x ve 30.000x) alınan CTS-60 (a-b), CTS-180(c-d) ve CTS-300 (e-f) ince filmlerine ait SEM görüntüleri

3.2 Cu₂SnS₃ numunelerinin optik özellikleri

3.2.1 Geçirgenlik-bant aralığı hesaplaması

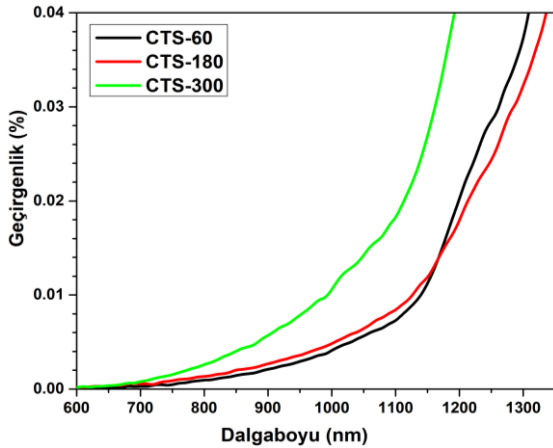
Oda sıcaklığında 600-1350 nm dalga boyu aralığında ölçülen geçirgenlik değerleri kullanılarak, örneklere ait soğurma katsayıları Lambert-Beer yasasına göre hesaplanmıştır [29]. Bu yasaya göre soğurma katsayısı Denklem (4) ile verilmiştir.

$$a = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (4)$$

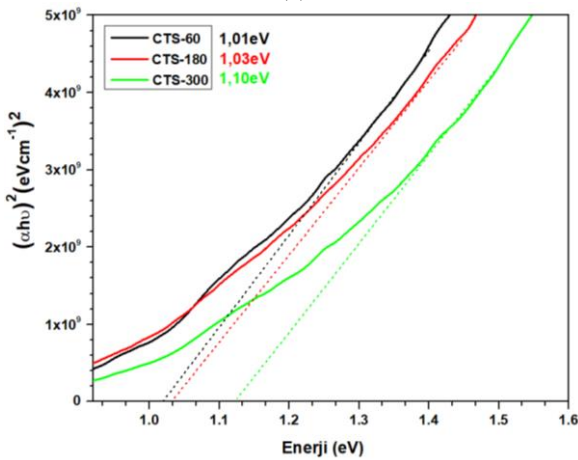
Bu bağıntıdaki α , soğurma katsayısını, d , numunenin kalınlığını ve T ise optik geçirgenliği temsil etmektedir. Denklem (4) yardımıyla hesaplanan α kullanılarak soğurma faktörü değerleri bant aralığı enerjisini hesaplamak için kullanılmıştır. Optik bant aralığı ve geçiş için iyi bilinen Tauc ilişkisi Denklem (5) kullanılarak belirlenmiştir [30].

$$(ahv) = A(hv - Eg)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Eg yasak enerji bant aralığı, A orantı sabiti, $h\nu$ fotonun enerjisidir. Burada n değeri ise geçiş doğasını ifade eder ve CTS gibi direkt geçişli yarıiletken malzemelerde $1/2$ değerini alır. Denklem (5) kullanılarak örneklerin $(ahv)^2 - (h\nu)$ grafiği çizdirilmiş ve grafikten filmin bant aralığı tespit edilmiştir. Bunun için grafikte, eğrinin lineer kısmının, $h\nu$ yatay eksenini kestiği nokta yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığını vermektedir. Şekil 5(a) ile verilen örnekler için geçirgenlik spektrumları incelendiğinde, görünür bölgenin tamamı ile yakın kızılötesi bölgenin bir kısmında yüksek soğurma gösterdiği, en yüksek geçirgenlik değerinin %4 ile sınırlı olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 5. 525 °C'de 3 farklı sürede tavlanmış CTS ince filmlerin (a) geçirgenlik ve (b) $(ahv)^2 - (h\nu)$ grafiği

Bu hesaplamalar ince filmlerin elektriksel özelliklerini anlamaya yönelik avantaj sağlar ve bu filmlerin optik ve elektriksel davranışlarını ayrıntılı bir şekilde karakterize etmeye katkı sağlamaktadır. Şekil 5(a)'da CTS-60 ve CTS-180 örneklerinde 1200 nm civarında, CTS-300'ün ise 1100 nm civarında hızlı bir geçişin olduğu ve bu geçişlere karşılık gelen yasak enerji aralık değerlerinin, Şekil 5(b)'te örneklerin soğurma spektrumlarından belirlenen Eg değerleri ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. CTS ince film yasak bant aralığında meydana gelen değişimler, ince filmin kristal yapısını ve morfolojisini belirleyen ana etkenlere doğrudan etkisi bulunmaktadır. CTS fazının yasak enerji aralığı; monoklinik kristal yapı için ~ 0.9 - 1.0 eV, kübik kristal yapısında yaklaşık olarak 1.3 - 1.4 eV ve tetragonal yapısında ise yaklaşık 1.6 - 1.7 eV civarındadır [31]. Diğer taraftan Sn_2S_3 fazının CTS ince filmin özellikleri üzerine net bir etkisinin olduğuna dair sınırlı sayıda çalışma var olmakla beraber, bu çalışmaların birinde Na katkısı ile Sn_2S_3 fazının CTS ince film yüzeyinde ince bir katman olarak oluştuğu, bunun da hücre performansını kötüleştirdiği rapor edilmiştir [32]. Ancak, bu çalışmada Sn_2S_3 fazının CTS ince filmlerin üzerine net bir etkisinin olduğu tespit edilmedi.

3.2.2 Cu_2SnS_3 numunelerinin elektriksel özellikleri

Yaklaşık $0,48$ T manyetik alan yoğunluğu altında ve 0.1 mA akım kullanılarak Van der Pauw yöntemi ile belirlenen elektriksel özelliklere ait özdirenç, taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı tipi gibi sonuçlar Tablo 3'de sunulmuştur. Tüm ince filmler p-tipi iletkenlik göstermekle beraber CTS-60, CTS-180 ve CTS-300 örneklerinin özdirenç değerleri sırasıyla 2.48 Ohm-cm, 1.64 Ohm-cm ve 3.78 Ohm-cm ve taşıyıcı yoğunlukları 5.5×10^{16} cm⁻³, 4.5×10^{17} cm⁻³ ve 9.7×10^{16} cm⁻³ olarak ölçüldü.

Tablo 3. Örneklere ait özdirenç ve taşıyıcı yoğunluğu değerleri

	CTS-60	CTS-180	CTS-300
Özdirenç (Ohm-cm)	2.48	1.64	3.78
Taşıyıcı Yoğunluğu (cm ⁻³)	5.5×10^{16}	4.5×10^{17}	9.7×10^{16}
İletkenlik Tipi	p-tipi	p-tipi	p-tipi

Sn_2S_3 ince filmleri malzemenin büyüme koşullarına bağlı olarak hem n-tipi hem de p -tipi elektriksel iletkenliğe sahip olduğu bilinmektedir [33, 34]. Bu fazın yapının içerisinde hangi tipte oluştuğu belirlenemediğinden ince filmlerin elektriksel özellikler üzerine etkisi hakkında net bir yorum getirmenin mümkün görünmemektedir. Ancak, n tipi Sn_2S_3 'nin oluşma ihtimalinin çoğunluk akım taşıyıcıları boşlukların azalmasını tetikleyeceği, bunun da hücre performansını olumsuz etkileyeceği söz konusudur. Diğer taraftan yapıdaki bir diğer ikincil CuS fazı iletken bir faz olarak bilinmektedir. Ancak XRD analizlerinde de görüldüğü üzere pik şiddetinin göreceli olarak çok düşük olması taşıyıcı konsantrasyonu üzerine bariz bir etkisinin olduğu düşünülmemekle beraber CTS-60 ve CTS-180 örneklerindeki düşük taşıyıcı konsantrasyon değerleri ikincil CuS fazına kısmen atfedilebilir. Güneş pili uygulamaları için arzu edilen elektriksel özellikler olarak gösterilen en düşük özdirenç ve en yüksek taşıyıcı yoğunluğu değerlerine CTS180 ince filmi sahip olduğu belirlenmiş olup elektriksel

ölçüm sonuçlarının yapısal ve optik analizlerin sonuçları ile uyum içerisindeydi.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada CTS öncül katman yapısı 2-metoksietanol-saf su karışım formundaki çözelti kullanılarak dönele kaplama yöntemiyle kaplanmış ve farklı sülfürleme sürelerinin (60sn, 180sn ve 300sn) kullanılması ile üretilen CTS ince filmlerin bazı yapısal, optik ve elektrik özellikleri analiz edilmiştir. EDX ölçüm sonuçlarına göre tüm örneklerin Cu-zengini yapıda olduğu görülmüş olup, XRD ve Raman analizlerinde tüm CTS filmlerinin monoklinik kristal yapıda kristalleştiği ancak Cu zengini yapıya atfedilen $Cu_5Sn_2S_7$ faz oluşumunun meydana geldiği tespit edilirken, CTS-60 ve CTS-300 örneklerinde Sn_2S_3 ikincil fazının varlığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda, CTS-180 örneğinin diğer örneklerle göre daha yüksek kristal kaliteye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Karışım içerisindeki saf suyun boşluksuz, mikron-altı boyutlarda taneli ve kompakt bir morfoloji oluşumunu desteklediği SEM analizleri ile ortaya konmuştur. Monoklinik CTS fazına ait beklenen yasak enerji değerinin düşük sülfürleme süreli örneklerde (CTS-60 ve CTS-180) elde edilmiştir. p tipi iletkenlik gösteren, en düşük (1.64 Ohm-cm) özdirenç ve en yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna ($4.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) sahip CTS-180 örneğinin en uygun elektriksel özelliklere sahip olduğu değerlendirilmiştir. Yapılan bütün bu analizlerin ışığında, en uygun özelliklere sahip CTS-180 ince filminin fotovoltajik uygulamada kullanılma potansiyelinin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmış olup, araştırma grubumuz tarafından konu ile ilgili çalışmalara devam edilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK ARDEB tarafından yürütülen 122F217 numaralı proje ve BİDEB tarafından yürütülen "BİÇABA Birlikte Çalışıp Birlikte Başaracağız" Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] I. M. El Radaf and A. S. Hassanien, Effect of thickness on structural, optical, and optoelectrical properties of sprayed $CuInSnS_4$ thin films as a new absorber layer for solar cells. *Physica B: Condensed Matter*, 659, 414867, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.414867>.
- [2] G. P. Reddy and K. R. Reddy, Preparation and characterization of Cu_2SnS_3 thin films by two stage process for solar cell application. *Materials Today: Proceedings*, 4(13), 12401-12406, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.010>.
- [3] G. P. Reddy and K. R. Reddy, Physical Properties of Cu_2SnS_3 Thin Films Prepared by Sulfurization of co-sputtered Cu-Sn Metallic Precursors. *Materials Today: Proceedings*, 4(14), 12518-12524, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.054>.

- [4] M. M. Abusnina, Synthesis and characterization of kesterite Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) thin films for solar cell applications. Ph.D. Thesis, University of Denver, USA, 2016.
- [5] M. Adelifard, M. M. B. Mohagheghi and H. Eshghi, Preparation and characterization of Cu_2SnS_3 ternary semiconductor nanostructures via the spray pyrolysis technique for photovoltaic applications. *Physica Scripta*, 85(3), 035603, 2012. <http://doi.org/10.1088/0031-8949/85/03/035603>.
- [6] H. Queisser and W. Shockley, Some theoretical aspects of the physics of solar cells. *Energy Conversion for Space Power*, 3, 317, 1961.
- [7] M. Umehara, S. Tajima, Y. Aoki, Y. Takeda and T. Motohiro, $Cu_2Sn_{1-x}Ge_xS_3$ solar cells fabricated with a graded bandgap structure. *Applied Physics Express*, 9(7), 072301, 2016. <http://doi.org/10.7567/APEX.9.072301>.
- [8] E. A. Pogue, A. Sutrisno, N. E. Johnson, M. B. Goetter, Z. Jiang, N. E. Johnson, D. P. Shoemaker, and A. A. Rockett, Phase stability and structural comparison of phases in the Cu-Zn-Sn-S system using solid-state NMR. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 190, 37-48, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.007>.
- [9] D. Avellaneda, M. Nair and P. Nair, Cu_2SnS_3 and Cu_4SnS_4 thin films via chemical deposition for photovoltaic application. *Journal of the Electrochemical Society*, 157(6), D346-D352, 2010. <http://doi.org/10.1149/1.3384660>.
- [10] A. C. Lokhande, K. V. Gurav, E. Jo and J. H. Kim, Chemical synthesis of Cu_2SnS_3 (CTS) nanoparticles: A status review. *Journal of Alloys and Compounds*, 656, 295-310, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.232>.
- [11] J. A. Oke and T. C. Jen, Atomic layer deposition and other thin film deposition techniques: from principles to film properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2481-2514, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.064>.
- [12] H. Guan, H. Shen, C. Gao and X. He. Structural and optical properties of Cu_2SnS_3 and Cu_3SnS_4 thin films by successive ionic layer adsorption and reaction. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24, 1490-1494, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10854-012-0960-x>.
- [13] A. Weber, R. Mainz and H. W. Schock, On the Sn loss from thin films of the material system Cu-Zn-Sn-S in high vacuum. *Journal of Applied Physics*, 107, 013516, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3273495>.
- [14] V. Robles, J. F. Trigo, C. Guillén and J. Herrero, Copper tin sulfide (CTS) absorber thin films obtained by co-evaporation: Influence of the ratio Cu/Sn. *Journal of Alloys and Compounds*, 642, 40-44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.04.104>.
- [15] J. Tao, L. Chen, H. Cao, C. Zhang, J. Liu, Y. Zhang and J. Chu, Co-electrodeposited Cu_2ZnSnS_4 thin-film solar cells with over 7% efficiency fabricated via fine-tuning of the Zn content in absorber layers. *Journal of*

- Materials Chemistry A, 4(10), 3798-3805, 2016, <https://doi.org/10.1039/C5TA09636G>.
- [16] Q. Chen, X. Dou, Y. Ni, S. Cheng and S. Zhuang, Study and enhance the photovoltaic properties of narrow-bandgap Cu_2SnS_3 solar cell by p-n junction interface modification. *J Colloid Interface Sci.* 15;376(1):327-30,2012. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.03.015>
- [17] E. Indubala, N. Sneha, V. Sudha and S. Harinipriya, Non-vacuum synthesis of CZTS by sulphurization of electrochemically layered zinc and tin on copper. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 101, 3745, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.05.027>
- [18] H. Ahmoum, P. Chelvanathan, M. S. Su'ait, M. Boughrara, G. Li, A. H. Al-Waeli and N. Amin, Impact of preheating environment on microstructural and optoelectronic properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) thin films deposited by spin-coating. *Superlattices and microstructures*, 140, 106452, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106452>.
- [19] W. Wang, M. T. Winkler, O. Gunawan, T. Gokmen, T. K. Todorov, Y. Zhu, and D. B. Mitzi, Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 4(7), 1301465, 2014. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301465>.
- [20] A. Cho, S. Banu, Y. Cho, S. K. Ahn, J. H. Yun and J. S. Cho, The effect of metal-chelate complex in Cu_2SnS_3 thin film solar cells and their characteristics, photovoltaic performance, and defect analysis. *Solar Energy*, 185, 131-145, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.065>.
- [21] S. Dias, B. Murali and S. B. Krupanidhi. Solution processible Cu_2SnS_3 thin films for cost effective photovoltaics: Characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 167, 309-314, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.10.049>.
- [22] M. P. Suryawanshi, U. V. Ghorpade, S. W. Shin, S. A. Pawar, I. Y. Kim, C. W. Hong and J. H. Kim, A simple aqueous precursor solution processing earth-abundant Cu_2SnS_3 absorbers for thin-film solar cells. *ACS applied materials & interfaces*, 8(18), 11603-11614, 2016. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b02167>.
- [23] M. Bouaziz, M. Amlouk and S. Belgacem, Structural and optical properties of Cu_2SnS_3 sprayed thin films. *Thin Solid Films*, 517(7), 2527-2530, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.039>.
- [24] M. H. Sayed, E. V. Robert, P. J. Dale and L. Gütay, Cu_2SnS_3 based thin film solar cells from chemical spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 669, 436-439, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.002>.
- [25] V. Uvarov and I. Popov. Metrological characterization of X-ray diffraction methods at different acquisition geometries for determination of crystallite size in nano-scale materials. *Materials Characterization*, 85, 111-123, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.09.002>.
- [26] D. M. Berg, R. Djemour, L. S. Gütay, P. J. Dale, X. Fontane and A. Rodriguez, Raman analysis of monoclinic Cu_2SnS_3 thin films. *Applied Physics Letters*, 100(19), 192103, 2012. <https://doi.org/10.1063/1.4712623>.
- [27] D. P. Antunez, A. D. Torelli, Y. Fan, A. Federico, Rabuffetti, N. S. Lewis and L. Brutchey, Low temperature solution-phase deposition of SnS thin films *Chemistry of Materials*, 26(19), 5444-5446, 2014. <https://doi.org/10.1021/cm503124u>.
- [28] G. Dölek, Perovskit güneş hücrelerinde kaliksaren molekül temelli kendiliğinden oluşan tek tabaka arayüzey modifikasyonunun performans üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi. Türkiye, 2020.
- [29] J. I. Pankove, *Optical processes in semiconductors*: Courier Corporation, 1975.
- [30] O. G. Abdullah, S. B. Aziz, K. M. Omer and Y. M. Salih, Reducing the optical band gap of polyvinyl alcohol (PVA) based nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 5303-5309, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3067-3>.
- [31] T. Bayazit, M. A. Olğar, T. Küçükömeroğlu, E. Bacaksız and M. Tomakin, Growth and characterization of Cu_2SnS_3 (CTS), Cu_2SnSe_3 (CTSe), and Cu_2Sn (S, Se) (CTSSe) thin films using dip-coated Cu-Sn precursor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 12612-12618, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01622-4>.
- [32] J. Chantana, K. Tai, H. Hayashi, T. Nishimura, Y. Kawano and T. Minemoto. Investigation of carrier recombination of Na-doped Cu_2SnS_3 solar cell for its improved conversion efficiency of 5.1%. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 206, 110261, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110261>.
- [33] T. S. Reddy, M. C. S. Kumar and S. Shaji, Deposition rate dependant formation and properties of Sn_2S_3 and SnS thin films by co-evaporation, *Materials Research Express*, 4, 046404, 2017. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa6b71>.
- [34] T. S. Reddy and M. C. S. Kumar, Co-evaporated SnS thin films for visible light photodetector applications, *RSC Advances*, 6, 95680-95692, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6RA20129F>.





Levrek (*Dicentrarchus labrax*) derisinden jelatin ekstraksiyonu: Fonksiyonel, tekstürel ve spektroskopik özellikler üzerine bir araştırma

Extraction of gelatin from sea bass (*Dicentrarchus labrax*) skin: an investigation on functional, textural, and spectroscopic properties

Ümran Cansu^{1,*} 

¹ Harran Üniversitesi, OSB Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, 63200, Şanlıurfa Türkiye

Öz

Balık derisi jelatini; gıda, kozmetik ve sağlık endüstrisinde fonksiyonel bir ürün olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada; Levrek (*Dicentrarchus labrax*) derisinden jelatin elde edilmiş ve jel gücü, viskozite gibi kalite parametreleri ve fonksiyonel özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, levrek derisinden yüksek verimle (%35.15) jelatin üretilebileceğini ve yüksek jel gücü (281 g) ve viskozite (9.64-5.02 cP) değerlerine ulaşabileceğini göstermiştir. Toz jelatinin yüksek protein (%88.92) oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. UV absorpsiyonu ve FTIR spektrumu sonuçları, sekonder yapılarının diğer balık jelatinlerine benzer olduğunu göstermiştir. Ayrıca toz jelatinin su tutma kapasitesi (STK), yağ bağlama kapasitesi (YBK) ve köpük oluşturma kapasitesi (KOK) sırasıyla, %184.80, %269.00 ve %68.30 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar, levrek derisi jelatininin gıda formülasyonlarının doku iyileştirme ve kıvam artırma gibi uygulamaları için alternatif bir kaynak olabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Levrek derisi, jelatin, jel gücü, tekstür, FTIR

1 Giriş

Jelatin, bağ dokusundaki ana yapısal protein olan kolajenin kısmi ve geri dönüşü olmayan hidrolizi sonucu elde edilen çok fonksiyonlu bir proteindir [1]. Biyo-uyumlu ve biyo-bozunur olmaları nedeniyle hem kolajen hem de farklı jelatin ürünleri gıda, ilaç, kozmetik ve diğer birçok sanayi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Jelatin, gıda endüstrisinde çiğneme ve tekstürel özelliklerin geliştirilmesi, doku ve köpük stabilizasyonu, emülsiyon oluşturma ve stabilize etme, jelleşme, su bağlama kapasitesini geliştirme gibi amaçlarla kullanılmaktadır [1, 3].

Memelilerin bağ doku bakımından zengin dokularından elde edilen jelatin, kaynağına göre %46 domuz derisi, %29 sığır derisi, %23 sığır kemiği ve %2 oranında diğer kaynaklardan elde edilmektedir [4]. Balıkların deri, kemik ve pul gibi işleme atıklarından elde edilen jelatinin diğer kaynaklardan elde edilen jelatinlere göre ya benzer ya da üstün fonksiyonel, reolojik ve tekstürel özellikler gösterdiği tespit edilmiştir [1, 5, 6]. Ayrıca gerek dini inanışlardan dolayı gerekse domuz ve sığır kaynaklı enfeksiyonlar

Abstract

Fish skin gelatin is considered a functional product for food, cosmetic, and health industries. In this study, gelatin was obtained from skin of Sea Bass (*Dicentrarchus labrax*), and its quality parameters such as gels strength and viscosity and functional properties were investigated. The results showed that gelatin could be produced from Sea Bass skin with high yield (35.15%) and achieve high gel strength (281 g) and viscosity (9.64-5.02 cP). It was determined that the powder gelatin had a high protein content (88.92%). The UV absorption and FTIR spectrum results indicated that its secondary structures are similar to other fish gelatins. Moreover, water holding capacity (WHC), fat binding capacity (FBC), and foaming capacity (FC) of the powdered gelatin were determined 184.80%, 269.00% and 68.30%, respectively. The results indicate that sea bass skin gelatin has an alternative source for applications such as texture improvement and consistency enhancement of food formulations.

Keywords: Sea bass skin, gelatin, gel strength, texture, FTIR

nedeniyle, balık kaynaklı jelatinin daha güvenli olduğu değerlendirilmektedir [7].

Son yıllarda balık artıklarının jelatin üretiminde değerlendirilmesine olan yönelim başlıca iki temel nedene bağlanmaktadır. Bunlardan biri, balıkçılık endüstrisindeki yan ürünleri jelatin üretmek için kullanarak ekonomiye kazandırmak ve çevre kirliliğinin önüne geçmek, diğeri ise balık işleme artıklarının (deri, pul, kemik) bol miktarda bulunması ve düşük fiyatlara temin edilebilmesidir [8]. Balığın toplam ağırlığının yaklaşık %8-10'unu oluşturan balık derisi, su ürünleri işleme endüstrisinin başlıca yan ürünlerinden biridir [9]. Bu yüzden balık derisinin jelatin üretiminde kullanım potansiyeli üzerine yapılan çalışmalar artmış ve çeşitli balık derilerinden; çotra balığı (*Aluterus monoceros*) [10], tatlı su çipurası (*Tilapia*), çim sazı (*Ctenopharyngodon idella*) [11] derilerinden farklı yöntemler ile jelatin elde edilmiştir. Ayrıca gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*), çipura (*Sparus aurata*) ve levrek (*Dicentrarchus labrax*) balıkların işleme atıklarının jelatin elde edebilme kapasiteleri üzerine araştırmalar yapılmıştır [12]. Bunun yanı sıra deniz levreği (*Lates*

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: umrancansu@harran.edu.tr (Ü. Cansu)

Geliş / Received: 03.06.2024 Kabul / Accepted: 14.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1494568

calcarifer) derisinden de jelatin üretimi ve karakterizasyonu çalışmaları ve farklı koşulların etkisini inceleyen araştırmalar da mevcuttur [12, 13, 14]. Genel olarak yapılan çalışmalarda deri örneklerinin ham şekilde işlendiği görülmektedir. Bu durum elde edilen jelatinin saflık oranı olumsuz etkilenmektedir. Bunun yanında söz konusu olumsuzluklar levrek derisinden ön işlemler ile (kurutma, yağ ayırma vb.) kolajen izolasyonunun sağlanıp jelatin ekstraksiyonun gerçekleştirildiği çalışmalar yetersizdir. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmada, ülkemizde ve Dünya’da tüketimi yaygın olan levrek balığı (*Dicentrarchus labrax*) derisi dondurularak kurutulduktan sonra yağı alınmış ve jelatin ekstraksiyonunda kullanılmıştır. Söz konusu işlemler ile üretilen jelatinin ekstraksiyon verimi ve kalitesi yapılan diğer çalışmalar ile değerlendirilmiştir. Ayrıca levrek derisi jelatinin bağ yapısı ve bağ pozisyonları Fourier dönüşümlü kızılötesi ışık spektroskopisi ile belirlenmiş ve farklı çözücülerde ultra-viyole ışık absorpsiyon spektrumu incelenmiştir. Elde edilen jelatininin reolojik ve tekstürel özelliklerinin yanı sıra fonksiyonel özellikleri araştırılmış ve literatürdeki veriler ile karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Araştırmada materyal olarak kullanılan levrek balığı (*Dicentrarchus labrax*) derisi (yaklaşık 5 kg) Şanlıurfa ilinde bulunan balık satıcılarından temin edilmiştir. Balık derisi dondurulmuş halde laboratuvara getirilmiş, ekstraksiyon ve analizler yapıncaya kadar -18°C’de ağzı kilitli poşetler içinde muhafaza edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıktadır ve Sigma Aldrich’ten (Darmstadt, Almanya) temin edilmiştir.

2.2 Metot

2.2.1 Balık derilerinin kurutulması ve yağdan arındırma

Balık derisi -18°C’de 24 saat dondurulduktan sonra dondurarak kurutucu (Armfield SB4, Ringwood, İngiltere) kullanılarak -40°C kondenser sıcaklığı ve 20 mbar vakum altında 18 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulan balık derisi 3×3 cm² ebatlarında kesilmiş ve ağzı kapalı plastik poşetlerin içinde -18°C’de muhafaza edilmiştir [15].

Kuru balık derisinden yağın uzaklaştırılması için çözücü ekstraksiyonu yöntemi uygulanmıştır [16]. Kuru balık derisi örnekleri n-hegzan ile 1/10 (g/mL) oranında karıştırılarak çalkalamalı inkübatörde (Lab-Line, USA) 35°C’de ve 150 rpm hızda 1 saat yağ ayırma işlemine tabi tutulmuştur. Yağı ayrılan deri örnekleri, n-hegzanın uzaklaştırılması için 45°C’deki etüvde (Nüve Fn 500, Ankara, Türkiye) 30 dk bekletilmiştir.

2.2.2 Balık derisinden kolajen izolasyonu

Ekstraksiyon işleminden önce kurutulup yağdan arındırılan balık derisi örneklerinde kolajen izolasyonu seyreltik alkali ve asit ile gerçekleştirilmiştir. Balık derisinde kolajen dışındaki proteinlerin uzaklaştırılması için 10 g balık derisi 1/20 (g/mL) oranında 0.1 N NaOH çözeltisi ile karıştırılmış ve oda sıcaklığında 1 saat bekletilmiştir. Ardından deri, distile su ile 3 defa yıkanmış ve tülbentle

süzülmüştür. Alkali ile muamele edilen deri örnekleri kolajenin kısmi hidrolizi ve suda daha kolay çözünmesi için 1/20 (g/mL) oranında 0.1 N HCl çözeltisi ile karıştırılmış ve oda sıcaklığında 1 saat bekletilmiştir. Daha sonra, süzülen ve 3 defa distile su ile yıkanan deri jelatin ekstraksiyonuna hazır hale getirilmiştir [6].

2.2.3 Jelatin ekstraksiyonu

Levrek derisinden jelatin ekstraksiyonu; kolajen izolasyonundan alınan deri örneklerinin üzerine 1/20 (g/mL) oranında distile su ilave edilmiş ve su banyosu yardımıyla 55°C’de 4 saat süresince ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Jelatin çözeltileri vakumlu filtrasyon düzeneği kullanılarak kaba filtreden geçirildikten sonra 5’er mL alınarak verim analizleri için saklanmıştır. Toz jelatin eldesi için jelatin çözeltileri 40°C’deki etüvde (Mikrotest MKD420, Türkiye) kurutulmuştur. Ekstraksiyon verimi hesaplamaları aşağıda belirtilen Denklem 1 ve 2’ye göre yapılmıştır [6].

$$\text{Jelatin verimi (\%)} = \frac{\text{Jelatin ağırlığı(g)}}{\text{Kuru deri ağırlığı(g)}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Protein gerikazanımı (\%)} = \frac{\text{Özütlenen protein miktarı (g)}}{\text{Kuru derideki protein miktarı (g)}} \times 100 \quad (2)$$

2.2.4 Biyokimyasal kompozisyon

Kuru jelatin ve kurutulmuş balık derisinin protein, nem, kül ve ham yağ oranları AOAC [16] yöntemlerine göre belirlenmiştir. Protein miktarı hesaplamalarında azot çevrim faktörü 5.4 olarak kullanılmıştır [16].

2.2.5 Jel gücü ve viskozite

Levrek derisi jelatininin jel gücü analizi, BSI:757 [17] standardında belirtilen yöntemde değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %6.67’lik (g/mL) 40 mL jelatin çözeltisi, kapaklı polipropilen kaplarda jel oluşumu için 4°C’de 16 saat süreyle olgunlaştırılmıştır. Jel gücü (P/0.5) prob ile donatılmış tekstür analiz cihazı (TA-XT II, Stable Micro Systems Ltd., Godalming, UK) ve standart deney parametreleri ile belirlenmiştir [17]. Jelatin çözeltilerinin viskozitesi GMIA [18] tarafından belirtilen yöntemle göre belirlenmiştir.

2.2.6 Tekstür profil analizi

Ağırlıkça %6.67’lik (g/mL) jelatin çözeltisi 4°C’de 16 saat olgunlaştırıldıktan sonra 50 mm çapında dairesel bir proba donatılmış tekstür analiz cihazı (TA-XT II, Stable Micro Systems Ltd., Godalming, UK) kullanılarak tekstür profil analizi (TPA) için kullanılmıştır. TPA grafiği elde etmek için 20 mm uzunluk ve 20 mm çapındaki numuneler %40 sıkıştırma seviyesinde preslenerek TPA parametreleri (Sertlik, yapışkanlık, çignenebilirlik ve sakızimsılık) elde edilmiştir [19].

2.2.7 Fonksiyonel özellikler

Toz levrek jelatininin su tutma kapasitesi (STK) ve yağ bağlama kapasitesi (YBK) Cho vd. [20] tarafından belirtilen yöntemle göre tespit edilmiştir. Levrek jelatinine ait STK ve

YBK değerleri aşağıdaki **Denklem 3** ve **4** kullanılarak tespit edilmiştir.

$$\text{STK (\%)} = \frac{\text{Pellet} - \text{jelatin ağırlığı (g)}}{\text{Jelatin ağırlığı (g)}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{YBK (\%)} = \frac{\text{Pellet} - \text{jelatin ağırlığı (g)}}{\text{Jelatin ağırlığı (g)}} \times 100 \quad (4)$$

Köpük oluşturma kapasitesi (KOK) ve köpük stabilitesi (KS) için levrek jelatininden ağırlıkça %1'lik çözeltiler 60°C'deki su banyosu kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti ölçülü silindire alındıktan sonra ultraturax cihazı (Velp OV5, cihaz marka model) ile 10000 rpm'de 1 dak karıştırıldıktan hemen sonra ve 30 dak sonra hacim kaydedilmiştir. KOK ve KS30 değerleri **Denklem 5** ve **6**'ya göre hesaplanmıştır [20].

$$\text{KOK (\%)} = \frac{\text{ÇH0(mL)} - \text{ÇH(mL)}}{\text{ÇH(mL)}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{KS30 (\%)} = \frac{\text{ÇH30(mL)} - \text{ÇH0(mL)}}{\text{ÇH0(mL)}} \times 100 \quad (6)$$

ÇH: Başlangıçtaki çözelti hacmi (mL)

ÇH0: Homojenizasyondan hemen sonraki hacim (mL)

ÇH30: Homojenizasyondan 30 dk sonraki hacim (mL)

KS30: 30. dk itibarı ile köpük stabilitesi (%)

Ağırlıkça %1'lik çözeltisi 60°C'deki su banyosunda çözündürülen levrek derisi jelatininin pH ve iletkenlik değeri bir multimetre (SevenGO SG23, Mettler Toledo, ABD) yardımıyla belirlenmiştir [20].

2.2.8 UV absorpsiyon spektrumu

Levrek jelatin örneğinin farklı çözücülerdeki UV absorpsiyon spektrumu için 25'er mg jelatin örneği 50 mL 0.5 M asetik asit, 50 mL fosfat tampon çözeltisi (pH 7.2) ve 50 mL saf su kullanılarak 60°C'de 30 dk boyunca su banyosunda çözündürülmüştür. Her bir çözelti için kör düzeltmesi yapılan spektrofotometrede (UV-Mini 1240 UV-VIS, Shimadzu, Kyoto, Japonya) 190-330 nm aralığında ve 0.2 nm/s tarama hızında spektrum profili tespit edilmiştir [11, 21].

2.2.9 Fourier dönüşümlü kızılötesi ışık spektroskopisi

Levrek derisi jelatininin bağ yapıları ve pozisyonları gibi yapısal özellikleri FTIR (IRTracer-100, Shimadzu, Japonya) ile ölçülmüştür. Jelatin örneğinin geçirgenlik spektrumu, ortam sıcaklığında 0.482 cm⁻¹ veri aralığı kullanılarak 4000 ila 500 cm⁻¹ aralığında ölçülmüştür [22].

2.2.10 Renk analizi

Levrek derisi jelatininin renk değerleri, PCE-CSM 4 renk ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Renk değerlerine ait hue ve chroma verilerinin hesaplanması için aşağıdaki **Denklem 7** ve **8** kullanılmıştır [16].

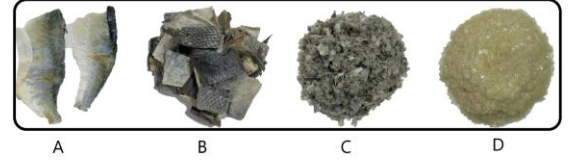
$$\text{Chroma} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (7)$$

$$\text{Hue} = \arctan \frac{b}{a} \quad (8)$$

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Biyokimyasal kompozisyon

Kurutulan ve yağ ayırma işleminden sonra elde edilen levrek derisi ve toz jelatinin biyokimyasal kompozisyonu **Tablo 1**'de verilmiştir.



Şekil 1. Levrek derisi (A), Kurutulmuş ve yağdan arındırılmış deri (B), Öğütülmüş deri (C) ve toz levrek derisi jelatini (D)

Levrek derisinde işleme kolaylığının sağlanması ve ekstraksiyonda yüksek verimin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen kurutma ve yağ ayırma işlemleri sonucunda elde edilen derilerin (**Şekil 1**) protein oranı 57.55±3.02 ve ham yağ oranı 9.25±1.52 olarak tespit edilmiştir. Ekstraksiyonda kullanılacak deri örneklerinde (3×3 cm² ebatlarında) kalan yağ oranı derinin iç kısımlarında olan ve çözücü ile uzaklaştırılmayan yağ olarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalarda jelatin üretiminde kullanılan ham maddedeki yağ gibi safsızlıkların ekstraksiyon prosesinde ekstrakte edilecek jelatinin çözücüye geçişini engelleyebileceği, ekstraksiyon verimini düşürdüğü ve ürünün kalitesini olumsuz etkilediği, deride kurutma ve yağ ayırma işlemleri uygulandığında daha yüksek jelatin verimi ve kalitesi beklenebileceği vurgulanmıştır [15, 23, 24].

Tablo 1. Levrek derisi ve elde edilen toz jelatinin biyokimyasal kompozisyonu (%)

	Protein*	Nem	Mineral	Ham yağ
Levrek derisi	57.55±3.02	6.97±0.38	19.65±1.08	9.25±1.52
Levrek derisi jelatini	88.92±0.16	5.04±0.24	2.80±0.78	2.05±0.20

* Azot çevrim faktörü, deri ve jelatin için (N×5.4) olarak kullanılmıştır, Ortalamalar standart sapma S.S. (±) ile beraber verilmiştir.

Elde edilen toz levrek derisi jelatininin biyokimyasal kompozisyonu ağırlıkça 88.92±0.16 protein, 5.04±0.24 nem, 2.80±0.78 mineral madde ve 2.05±0.20 ham yağ (g/100g toz jelatin) şeklinde tespit edilmiştir (**Tablo 1**). Farklı balık derilerinden elde edilen jelatinlerde protein oranının %71.11-89.70, nem oranının %2.08-9.91, kül oranının %0.05-4.02 ve ham yağ oranının %0.002-2.58 arasında olduğu belirtilmiştir [6, 9, 25]. Toz jelatin örneklerindeki protein ve diğer bileşenlerin oranları özellikle uygulanan ön işlemler (temizleme, yağ ayırma vb.) ve ekstraksiyon prosesinden kaynaklanmaktadır [6, 13, 14]. Jelatin gibi protein izolatlarında en önemli bileşen ham proteindir.

Jelatinin protein içeriği, oluşturduğu jelin kuvveti ile ilişkilendirilmekle beraber jelatin molekülleri arasındaki hidrojen bağlarının daha güçlü olmasını sağlamaktadır [25]. Dolayısıyla yüksek protein içeriği elde edilen toz jelatinin kalitesini de yükseltmektedir.

3.2 Ekstraksiyon verimi ve fonksiyonel özellikler

Levrek derisinden yapılan jelatin ekstraksiyonunda verim ve protein geri kazanımı değerleri kuru ağırlık bazında sırasıyla %35.15±0.05 ve 66.45±2.30 olarak gerçekleşmiştir (Tablo 2). Çeşitli balık derileri ile yapılan jelatin ekstraksiyon verimleri ise; Asya levreğinde (*Lates calcarifer*) %63.7, Nil levreğinde %64.3 ve pembe levrekte %27.3 olarak rapor edilmiştir [26]. Farklı balık türlerine ait jelatin verimleri muhtemelen derinin yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [14]. Aynı zamanda jelatin ekstraksiyonunda verim değeri; çözücü pH'nın yanı sıra sıcaklık, süre, çözücü oranı, ham maddenin geometrik yapısı ve boyutu gibi ekstraksiyon parametrelerinden etkilenmektedir [15]. En önemli fiziksel parametreler arasında yer alan verim, finansal fayda ile ilişkili olarak üretim sürecinde sıklıkla dikkate alınmaktadır [27].

Tablo 2. Levrek derisi jelatininin verim değerleri ve bazı fonksiyonel özellikleri

	Levrek derisi jelatini
Jelatin verimi (%)	35.15±0.05
Protein geri kazanımı (%)	66.45±2.30
Su tutma kapasitesi (%)	184.80±8.70
Yağ bağlama kapasitesi (%)	269.00±12.90
Köpük oluşturma kapasitesi (%)	68.30±5.80
Köpük stabilitesi (30 dak) (%)	55.00±2.80
pH	4.96±0.05
İletkenlik (µS/cm)	274.00±11.40

Ortalamalar standart sapma S.S. (±) ile beraber verilmiştir.

Gıda sanayinde jelatin; jelleştirici, kıvam artırıcı, su bağlayıcı vb. gibi çok fonksiyonlu olarak değerlendirilmesi gerek ürün iyileştirmede gerekse de maliyet açısından önem arz etmektedir. Jelatinin su bağlama ve yağ tutuma özellikleri, hem su hemde yağ fazının bulunduğu gıda formülasyonlarında tek başına kullanılma imkanı sağlamaktadır [3]. Su bağlama ve yağ tutma kapasitesi, bir proteinin su ve yağı protein matrisi içinde tutabilme yeteneğidir. Levrek derisi jelatinin STK (%) ve YBK (%) sırasıyla 184.80±8.70 ve 269.00±12.90 olarak tespit edilmiştir (Tablo 2). Çotra balığı (*Aluterus monoceros*) ve resif morina balığı (*Epinephelus chlorostigma*) derisi jelatini için STK sırasıyla %250-273 ve %270.288, YBK ise %527 ve 550 olarak tespit edilmiştir. Jelatinde toplam hidrofobik kalıntılar ve kovalent olmayan bağlar, YBK'nden sorumludur [28]. Jelatinin STK, polar yapısına ve üç boyutlu yapısıyla ilişkilidir. Aynı zamanda yüksek STK jelatinlerin daha viskoz yapılar oluşturmalarına olanak sağlamaktadır [4].

Kolajenin kısmi hidrolizi ile elde edilen jelatin fraksiyonlarının zincir uzunluğu; gaz-sıvı yüzeyinde moleküllerin taşınmasını tetikleyerek köpüklenme özellikleri üzerinde etkili olmaktadır [28, 29]. Levrek derisinden ekstrakte edilen jelatinin KOK (%) ve KS30 (%)

değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar levrek derisi jelatinin KOK (%) değeri 68.30±5.80 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca 30 dk sonunda sergilediği KS30 (%) değeri %55.00±2.80'dir. Casanova vd. [30]'nın yaptıkları çalışmada ticari balık jelatininin %94, kömür balığı (*Pollachius virens*) derisinden elde edilen jelatinin ise %76-114 arasında KOK değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek visko-elastik davranış sergileyen ve hava-su arayüzünde güçlü protein ilişkisi ile bağdaştırılan KS değerleri levrek derisi jelatini için (30 dk) 55.00±2.80 olarak gerçekleşmiştir ki bu değer kömür balığının (*Pollachius virens*) 30 dk sonundaki KS değeri ile %52 ve %56 benzerlik göstermektedir [30].

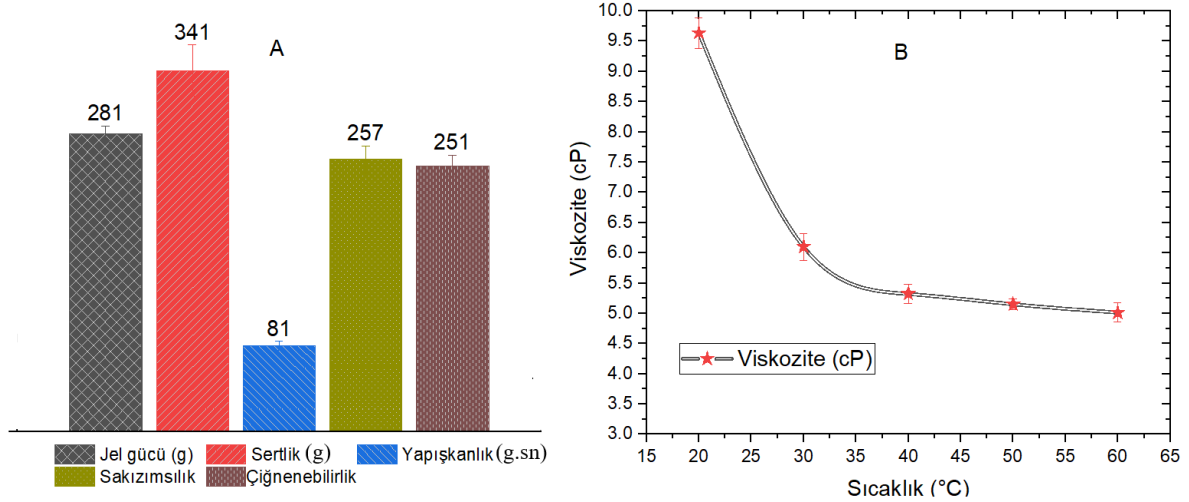
Levrek derisinin iletkenlik ve pH değeri sırasıyla 274.00±11.40 (µS/cm) ve 4.96±0.05 olarak tespit edilmiştir. Yüksek veya düşük pH değerleri genellikle kullanılan çözücünün türünden özellikle konsantrasyondan ve asit çözültisinde bekletilme süresinden etkilenmektedir. Bu durum viskozite ve jel gücü gibi jelatinin karakteristik özelliklerini de etkileyebilmektedir [6, 30].

3.3 Levrek derisi jelatininin jel gücü, viskozite ve tekstürel özellikleri

Jel gücü, jelatinin önemli bir fiziksel özelliği ve kalitesini belirleyen endekslerden biri olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen levrek derisi jelatininin jel gücü 281±8.0 g olarak tespit edilmiştir (Şekil 2-A). Çeşitli balık derilerinden elde edilen jelatinlerin jel gücü değerleri tatlı su çipurası (*Tilapia*) için 303-311 g, çim sazı (*Ctenopharyngodon idella*) için 276-308 g ve deniz levreği (*Dicentrarchus labrax*) için 245-315 g arasındadır [31]. Bunun yanında farklı ebatlardaki levrek derileri ile elde edilen jelatinlerin jel gücü değerleri ise 223-322 g arasında olduğu tespit edilmiştir [14]. Ekstraksiyon sıcaklığının levrek derisi jelatini üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada ise jel gücü değerlerinin 180-280 g arasında olduğu ve sıcaklık artışının jel gücü değerini olumsuz etkilediği vurgulanmıştır [13].

Jelatinin viskozitesi genel olarak; amino asit profili, polidispersite ve molekül ağırlığına bağlı olarak değişirken, jel gücü değeri ise ortalama molekül ağırlığını etkileyen hidroliz derecesine ve oluşan kısa zincirli protein miktarına göre etkilenmektedir [6]. Önemli bir diğer kalite parametresi olarak değerlendirilen viskozite değeri (Şekil 2-B) ise 20 ve 60°C'de 9.64±0.25 ve 5.02±0.16 cP olarak tespit edilmiştir. Levrek derisinden farklı ön işlemler ile elde edilen jelatininin 60°C'deki viskozite değerinin 9.28 mPa olduğu belirtilmiştir [26]. Jelatin kalitesinde bir diğer önemli husus, jelatin jellerinin tekstürel profilidir. Elde edilen levrek derisi jelatininin tekstürel özellikleri Şekil 2-A'da verilmiştir.

Jelatinin jel yapısının sıkıştırma altındaki davranışı ile ilgili olan sertlik değeri 341±24.05 (g), jelatin jellerinin diğer yüzeyler ile arasındaki çekim kuvvetlerinin üstesinden gelmek için oluşturduğu negatif kuvvet olarak tanımlanan yapışkanlık değeri 81±4.30 (g.sn), sertlik ve yapışkanlığın bir parametresi olan ve yarı katı formundaki jellerin parçalanması için gereken enerjiyi temsil eden sakızimsılık değeri 257±12.98 ve sertlik değerine bağlı olan çignenebilirlik değeri ise 251±10.32 olarak tespit edilmiştir.

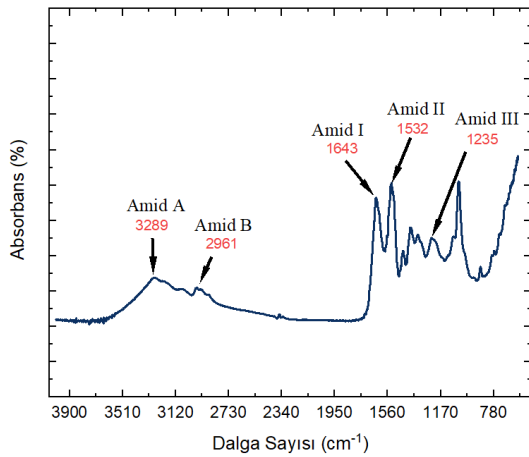


Şekil 2. Levrek derisi jelatinine ait tekstürel özellikler (A) ve sıcaklığa bağlı viskozite değişimi (B)

Çipura (*Oreochromis aureus*) derisinden elde edilen jelatinin sertlik ve çiğnenebilirlik değerleri sırasıyla 660 ± 22 g ve 250 ± 11 olarak tespit edilmiştir [32]. Benzer şekilde, %40 sıkıştırma ile analiz edilen yayın balığı (*Clarias gariepinus*) ve Sazan (*Cyprinus carpio*) derisi ve ticari sığır derisi jelatinlerinin tekstür profillerine oldukça yakın değerler sergilemiştir [33]. Bu bağlamda levrek derisinden, iyi bir dokusal profile sahip ve yüksek kaliteli jelatinin elde edildiği anlaşılmaktadır.

3.4 FTIR spektrumu ve kimyasal bağ konumları

Levrek derisinden elde edilen jelatin örneğinin fonksiyonel grupları ve sekonder yapısı FTIR ile incelenmiş ve Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Levrek derisi jelatinine ait FTIR spektrumu ve kimyasal bağ dağılımı

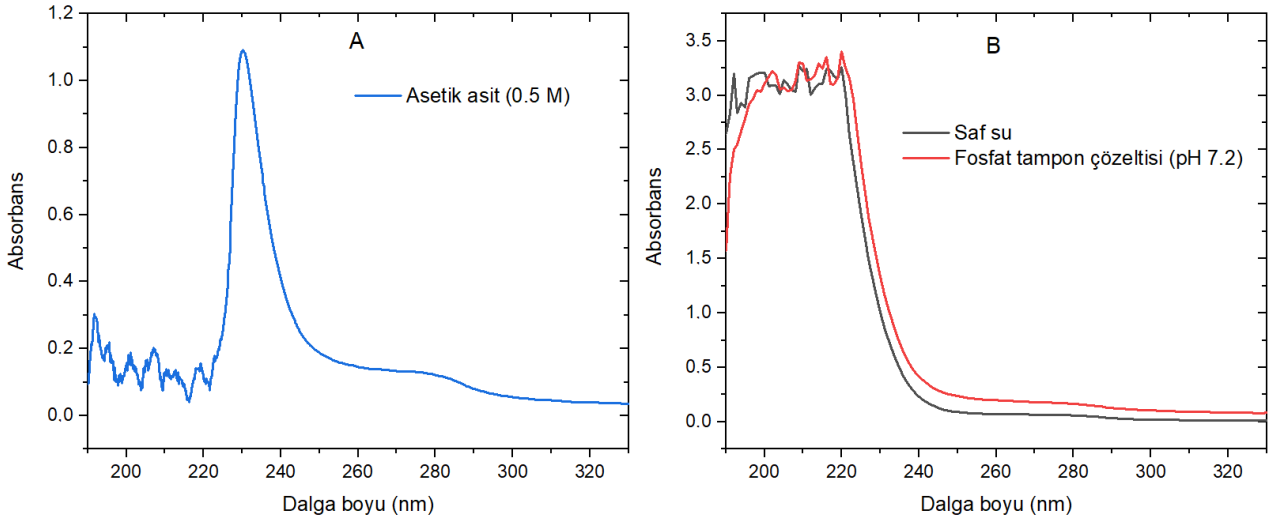
Amid A bandı jelatinde hidrojen bağının oluşumu ile N-H grubunun gerilmesini temsil etmektedir. Amid A bandı levrek derisi jelatini için 3289 cm^{-1} dalga boyunda tespit edilmiştir. Farklı koşullarda elde edilen levrek jelatinlerinin Amid A bandı değerleri ile 3290 cm^{-1} [13, 31] ve 3293 cm^{-1} [11, 13] ile benzer bulunmuştur. Kolajenin üçlü sarmal

formunu temsil eden Amid I bandı değeri (1643 cm^{-1}) yapılan diğer çalışmalara göre nispeten daha yüksek bulunmuştur. Bu durumun kolajenin α , β ve γ zincirlerinin yüksek parçalanma düzeyi sonucu oluşan düşük molekül ağırlıklı protein parçalarının barındırdığı C=O yapılarından kaynaklandığı belirtilmiştir [11, 31]. Jelatinin C-N gerilme ve N-H düzlem içi deformasyon modunu temsil eden Amid II değeri 1532 cm^{-1} dalga boyunda gerçekleşirken, $-\text{CH}_2$, glisin yapıları ve prolin yan zincirlerinden kaynaklanan titreşimleri temsil eden Amid III bandı değeri ise 1235 cm^{-1} olarak tespit edilmiştir. Levrek derisine ait Amid II ve III değerleri balık derilerinden elde edilen jelatinlerin sergilediği karakteristik değerlerinde gerçekleşmiştir [6, 11, 13].

3.5 UV absorpsiyon spektrumu

Jelatin örneğinin 190-330 nm dalga boyu arasında farklı çözeltiler ile gerçekleştirilen spektrum taraması sonuçları Şekil 4 (A-B)'de verilmiştir. Asetik asit ile hazırlanan spektrum taramasında levrek derisi jelatinine ait en yüksek pik noktası 230 nm dalga boyunda gerçekleşmiştir (Şekil 4A). Farklı kaynaklardan elde edilen ticari jelatinlerin de 230 nm civarında en yüksek pik noktası oluşturduğu ve kolajenin hidroliz derecesi arttığında elde edilen jelatinlerin daha geniş dalga boyunda en yüksek pik noktalarına sahip olduğu belirtilmiştir [34, 35]. Belirgin bir şekilde görülen ve 270-280 nm arasında bulunan dalgalanmanın fenilalanin, tirozin ve triptofan gibi aromatik kalıntıların bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Farklı kaynaklardan elde edilen ticari jelatinlerin UV absorpsiyon spektrumuna yer verilen çalışmada ise balık jelatinin ve diğer ticari jelatinlerin benzer spektrumlar sergilediği vurgulanmıştır. Söz konusu farklılıkların aminoasit profilinden kaynaklandığı açıklanmıştır [35].

Genel anlamda, her iki çözeltinin de 200 nm sonrası dalgalanmalar sergilediği tespit edilmiştir. Görünür bölgedeki en yüksek pik tepeleri hidrolizle kademeli olarak üretilen amid bağından kaynaklanmaktadır [34]. Tatlı su çipurası (*Tilapia*), çim sazanı (*Ctenopharyngodon idella*) ve



Şekil 4. Levrek derisi jelatinine ait farklı çözeltilerdeki görünür bölge spektrumları

deniz levreği (*Dicentrarchus labrax*) deri jelatinlerinin ultraviyole absorpsiyon spektrumları benzer bulunmuş ve maksimum absorpsiyon zirveleri sırasıyla 212 nm, 222 nm ve 222 nm dalga boylarında tespit edilmiştir [11].

3.6 Levrek derisi jelatininin renk değerleri

Ekstraksiyon sonunda kurtulup toz haline getirilen jelatinin rengine ilişkin çalışmanın sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Genel olarak renk değerleri toz jelatinlerin fonksiyonel özelliklerini etkilemez. Ancak jelatinin herhangi bir ürüne güçlü bir renk özelliği kazandırmaması ürün formülasyonuna dahil edilmesini daha kolaylaştırmaktadır [36]. Levrek derisi jelatininin renk parametreleri; parlaklık(L*), kırmızılık (a*) ve sarılık (b*) değerleri sırasıyla 80.78 ± 0.15 , -0.49 ± 0.10 ve 21.30 ± 0.11 şeklinde tespit edilmiştir. Rengin doygunluk derecesini temsil eden ve b*-değeri ile pozitif korelasyon gösteren Chroma değeri (21.23 ± 0.09) ve renk tonunu temsil eden Hue angle değerleri (-1.54 ± 0.05) elde edilen jelatinin saf ve doymayan bir sarı renge sahip olduğunu göstermektedir [37]. Jelatinin rengi, ham maddeye ve kullanılan ekstraksiyon yöntemine bağlı olarak değişebilir. Bunun yanında hammaddeden kaynaklı ekstraksiyon çözeltilisine geçen pigmentler elde edilecek toz jelatinlerin rengine katkıda bulunmaktadır [30, 36].

Tablo 3. Levrek derisi jelatininin renk değerleri

	Levrek derisi jelatini
L*	80.78 ± 0.15
a*	-0.49 ± 0.10
b*	21.30 ± 0.11
Chroma	21.23 ± 0.09
Hue angle	-1.54 ± 0.05

Ortalamalar standart sapma S.S. (\pm) ile beraber verilmiştir.

4 Sonuç

Artan balık üretimi beraberinde işleme artıkları miktarının da artmasına neden olmaktadır. Söz konusu

artıklar çevresel sorunlara yol açmakla birlikte ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada tüketimi oldukça yaygın olan levrek balığı derisinden standart bir yöntem ile jelatin elde edilmiş ve kalite, tekstürel ve fonksiyonel özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre levrek derisi jelatini yüksek verim ile elde edilmesinin yanında yüksek kalite değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Levrek derisi jelatininin diğer balık derileri ve ticari sığır derisi jelatinleri ile karşılaştırıldığında benzer fonksiyonel ve spektroskopik özellikler sergilediği belirlenmiştir. Levrek derisinin potansiyel bir jelatin hammadde kaynağı olmasının yanında üretilen toz jelatinin gıda uygulamaları, tıp, farmakoloji gibi birçok alanda değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar, bu makalede sunulan çalışmayla ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını teyit eder.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] X. Zhao, J. Wu, L. Chen and H. Yang, Effect of vacuum impregnated fish gelatin and grape seed extract on metabolite profiles of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during storage, Food Chemistry, 293, 418–428, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.001>
- [2] T. Wu, M. Ding, C. Shi, Y. Qiao, P. Wang, R. Qiao,... and J. Zhong, Resorbable polymer electrospun nanofibers: History, shapes and application for tissue engineering. Chinese Chemical Letters, 31(3), 617–625, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2019.07.033>.
- [3] L.C. Lv, Q. Y. Huang, W. Ding, X. H. Xiao, H. Y. Zhang and L. X. Xiong, Fish gelatin: The novel potential applications, Journal of Functional Foods, 63, 103581, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103581>.
- [4] T. Zhang, R. Sun, M. Ding, L. Li, N. Tao, X. Wang and J. Zhong, Commercial cold-water fish skin gelatin and

- bovine bone gelatin: Structural, functional, and emulsion stability differences, *LWT*, 125, 109207, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109207>.
- [5] X. Feng, V. K. Ng, M. Mikš-Krajnik and H. Yang, Effects of fish gelatin and tea polyphenol coating on the spoilage and degradation of myofibril in fish fillet during cold storage, *Food and Bioprocess Technology*, 10, 89–102, 2017. DOI 10.1007/s11947-016-1798-7.
- [6] Ü. Cansu, Comparative evaluation of different separation and concentration procedures on some quality and functional properties of fish gelatin. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 83, 103237, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103237>.
- [7] M. A. Ahmed, H. A. Al-Kahtani, I. Jaswir, H. AbuTorboush and E. A. Ismail, Extraction and characterization of gelatin from camel skin (potential halal gelatin) and production of gelatin nanoparticles, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(6), 1596-1601, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.03.022>.
- [8] S. R. Derkach, N. G. Voron'ko, Y. A. Kuchina and D. S. Kolotova, Modified fish gelatin as an alternative to mammalian gelatin in modern food technologies, *Polymers*, 12, 3051, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12123051>.
- [9] M. Nurilmala, H. H. Hizbullah, E. Karnia, E. Kusumaningtyas and Y. Ochiai, Characterization and antioxidant activity of collagen, gelatin, and the derived peptides from yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) skin, *Marine Drugs*, 18, 98, 2020. <https://doi.org/10.3390/md18020098>.
- [10] P. Kaewruang, S. Benjakul and T. Prodpran. Molecular and functional properties of gelatin from the skin of unicorn leatherjacket as affected by extracting temperatures, *Food Chemistry*, 138(2–3), 1431–1437, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.114>
- [11] Q. Ruan, W. Chen, M. Lv, R. Zhang, X. Luo, E. Yu,... and H. Ma, Influences of trypsin pretreatment on the structures, composition, and functional characteristics of skin gelatin of tilapia, grass carp, and sea perch, *Marine Drugs*, 21(8), 423, 2023. <https://doi.org/10.3390/md21080423>.
- [12] Üçyol, N. Gökkuşuğu alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*), çipura (*Sparus aurata*) ve levrek (*Dicentrarchus labrax*) balıklarının atıklarından jelatin elde edilebilirlik kapasitelerinin araştırılması. Yüksek lisans tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [13] S. Sinthusamran, S. Benjakul and H. Kishimura. Characteristics and gel properties of gelatin from skin of seabass (*Lates calcarifer*) as influenced by extraction conditions, *Food Chemistry*, 152, 276-284, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9817-5>.
- [14] S. Sinthusamran, S. Benjakul and H. Kishimura. Molecular characteristics and properties of gelatin from skin of seabass with different sizes, *International Journal of Biological Macromolecules*, 73, 146-153, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.11.024>
- [15] Ü. Cansu and G. Boran, Kinetic evaluation of gelatin extraction from chicken skin and the effect of some extraction parameters, *Journal of Food Process Engineering*, 45 (4), Article e13995, 2022 <https://doi.org/10.1111/jfpe.13995>.
- [16] AOAC, *Official Methods of Analysis*. Fifteenth edition. Association of Official Analysis Chemists, Washington, DC, 1990.
- [17] British Standards Institution (BSI), *Methods for sampling and testing gelatin (physical and chemical methods)*. London: BSI, 1975.
- [18] Gelatin Manufacturers Institute of America. 2019. *GMA Standard Methods for the Testing of Edible Gelatin*, New York, USA (pp. 13–15).
- [19] M. Bourne, *Food texture and viscosity: Concept and measurement*, Academic Press, New York, 370 pages, 2002.
- [20] S. M. Cho, K. S. Kwak, D. C. Park, Y. S. Gu, C. I. Ji and D. H. Jang, 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>.
- [21] R. Duan, J. Zhang, X. Du, X. Yao and K. Konno, Properties of collagen from skin, scale and bone of carp (*Cyprinus carpio*), *Food Chemistry*, 112(3), 702-706, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.020>.
- [22] Y. Liu, L. Xia, H. Jia, Q. Li, W. Jin, X. Dong and J. Pan, Physicochemical and functional properties of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) skin gelatin extracted at different temperatures, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), 5406-5413, 2017. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8431>.
- [23] N. M. Sarbon, F. Badii and N. K. Howell, Preparation and characterization of chicken skin gelatin as an alternative to mammalian gelatin, *Food Hydrocolloids*, 30: 143-151, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.009>
- [24] H. Sun, X. Ge, Y. Lv and A. Wang, Application of accelerated solvent extraction in the analysis of organic contaminants, bioactive and nutritional compounds in food and feed, *Journal of Chromatography*, 1237, 1–23, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.03.003>.
- [25] M. A. Amiza, W. M. Wan Maizatun Shima, I. Nor Hayati and M. Nizaha Juhaida. Optimization of gelatin extraction conditions from Cobia (*Rachycentron canadum*) skin and its physicochemical characteristics as compared to bovine gelatin, *International Food Research Journal*, 22(1), 213-224, 2015.
- [26] T. Sae-Leaw and S. Benjakul, Physico-chemical properties and fishy odour of gelatin from seabass (*Lates calcarifer*) skin stored in ice, *Food Bioscience*,

- 10, 59-68, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.02.002>.
- [27] S. F. Rosmawati, Sari and Asnani Syamsuddin, Effect of various extraction times on the physicochemical properties, functional groups, and microstructure of snakehead fish *Channa striata* skin-scale blended gelatin, *Fisheries Science*, 89(6), 853-862, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12562-023-01713-6>.
- [28] V. Renuka, C. N. R. Ravishankar, A. A. Zynudheen, J. Bindu and T. C. Joseph, Characterization of gelatin obtained from unicorn leatherjacket (*Aluterus monoceros*) and reef cod (*Epinephelus diacanthus*) skins, *LWT*, 116, 108586, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108586>.
- [29] B. F. Karim, Ü. Cansu, G. Boran, Quality and functional features of gelatine extracted from chicken skin in comparison with commercial gelatines from porcine, bovine and piscine, *Acta Alimentaria*, 51(2), 194-203, 2022. <https://doi.org/10.1556/066.2021.00228>
- [30] F. Casanova, M. A. Mohammadifar, M. Jahromi, H. O. Petersen, J. J. Sloth, K. L. Eybye,...and F. Jessen, Physico-chemical, structural and techno-functional properties of gelatin from saithe (*Pollachius virens*) skin, *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 918-927, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.047>
- [31] E. Yu, C. Pan, X. Luo, Q. Ruan, W. Chen, Y. Fang,... and H. Ma, Structural characteristics, component interactions and functional properties of gelatins from three fish skins extracted by five methods, *International Journal of Biological Macromolecules*, 248, 125813, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125813>.
- [32] Y. Xin, M. Chai, F. Chen, Y. Hou, S. Lai and H. Yang, Comparative study on the gel properties and nanostructures of gelatins from chicken, porcine, and tilapia skin, *Journal of Food Science*, 86(5), 1936-1945, 2021. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15700>
- [33] J. Tkaczewska, M. Morawska, P. Kulawik and M. Zajac, Characterization of carp (*Cyprinus carpio*) skin gelatin extracted using different pretreatments method, *Food Hydrocolloids*, 81, 169-179, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.048>.
- [34] M. Xu, L. Wei, Y. Xiao, H. Bi, H. Yang and Y. Du, Physicochemical and functional properties of gelatin extracted from Yak skin, *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, 1246-1253, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.020>.
- [35] Cansu Ü. Tavuk derisinden jelatin ekstraksiyonunda proses koşullarının kinetik ve termodinamik parametrelere etkisi. Doktora tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [36] H. Li, B. L. Liu, L. Z. Gao and H. L. Chen, Studies on bullfrog skin collagen, *Food Chemistry*, 84(1), 65-69, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00167-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00167-5)
- [37] A. Hamzeh, S. Benjakul, T. Sae-Leaw and S. Sinthusamran. Effect of drying methods on gelatin from splendid squid (*Loligo formosana*) skins. *Food Biosci.*, 26, 96-103, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.10.001>





Investigation of the effect of current density and ZrO₂ bath concentration on electrodeposited Ni-P/ZrO₂ composite coatings

Akım yoğunluğu ve ZrO₂ banyo konsantrasyonunun elektrodepolanmış Ni-P/ZrO₂ kompozit kaplamalar üzerindeki etkisinin incelenmesi

Ömer Hükümdar^{1,*} , Umut Kumlu² , Ali Keskin³ , Mustafa Atakan Akar⁴ ,

Muhammed Fatih Geçkin⁵ , Eda Nur Çamcı⁶ , Alperen Yılmaz⁷ 

^{1,2,3,4,5,6,7} Cukurova University, Department of Automotive Engineering, 01330, Adana, Türkiye

Abstract

In this study, Ni-P/ZrO₂ nanocomposite coatings were deposited on St-37 steel substrates using the electroplating method with varying ZrO₂ concentrations (10 g/L ve 20 g/L) and current densities (50 mA/cm² ve 75 mA/cm²). To investigate the effects of electrolyte components and current density on coating properties, analyses were performed regarding microhardness, wear performance, and surface morphology. As a result of the analyses, it is observed that different bath concentrations and current densities significantly affect properties such as morphology, hardness, and wear performance. It is seen that the surface morphologies of the obtained coatings are generally smooth, but it is understood from the optical images that the surfaces of all nanocomposite coatings are rougher. While adding ZrO₂ nanoparticles to the main matrix increases microhardness by approximately 40% compared to pure nickel, a similar but higher hardness value was obtained with the increase in current density. When examined in terms of wear performance, an average friction coefficient value of 3.15 times higher than that of pure nickel nanocomposite coatings was obtained.

Keywords: Electrodeposition, Ni-P alloy, Nanocomposite coating, Microhardness, Wear

1 Introduction

Low-carbon steel exhibits excellent mechanical properties as well as ease of production and recycling [1], [2]. However, its industrial applications are hampered by limitations in wear and corrosion resistance [3]. To overcome this challenge, various material surface modification techniques have been used, including electroplating, thermal spraying, vapor deposition, and non-electrolytic deposition [4]. Among these methods, electrolytic deposition stands out due to its simplicity and ability to effectively coat complex workpieces [5]. The process enhances wear resistance and corrosion protection, making it a widely adopted solution in the field of metal protection. In recent years, nickel-based coatings have been

Öz

Bu çalışmada, Ni-P/ZrO₂ nanokompozit kaplamalar, değişen ZrO₂ konsantrasyonları (10 g/L ve 20 g/L) ve akım yoğunlukları (50 mA/cm² ve 75 mA/cm²) ile elektrokaplama yöntemi kullanılarak St-37 çelik alt tabakalar üzerine biriktirildi. Elektrolit bileşenlerinin ve akım yoğunluğunun kaplama özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla mikrosertlik, aşınma performansı ve yüzey morfolojileri açısından analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda farklı banyo konsantrasyonun ve akım yoğunluğunun morfoloji, sertlik ve aşınma performansını gibi özellikleri ciddi miktarda etkilediği görülmektedir. Elde edilen kaplamaların genel olarak yüzey morfolojiler pürüzsüz olduğu görülmektedir ama nanokompozit kaplamaların hepsinde yüzeyinin daha pürüzlü olduğu optik resimlerden anlaşılmaktadır. Ana matrise eklenen ZrO₂ nanopartikülü ilavesi mikro sertliği saf nikelde göre yaklaşık %40 oranında artırırken, akım yoğunluğunun artmasıyla beraber yakın ama daha yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Aşınma performansı bakımından incelendiğinde, saf nikel nanokompozit kaplamalara göre 3.15 kat daha fazla ortalama sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrodepolama, Ni-P alaşım, Nanokompozit kaplama, Mikrosertlik, Aşınma

widely used in industry [6]. The Ni-P coating remains a widely used research topic among chemically deposited metals due to its extensive applicability in protective coating applications, which were first developed in the 1950s. However, the formation of defects such as pinholes and microcracks during the deposition process may result in corrosion failure of the coating, which limits its further use. Consequently, there is a significant research focus on reducing coating defects [7, 8]. Ni-P alloy coating technology has recently been important in developing these research areas. Among these research areas, promising methods, such as adding nanoparticles to the main matrix of metal coatings, can enhance protection and mechanical properties [9, 10]. Currently, nanoparticles such as Y₂O₃ (Yttrium oxide) [11], WC (Tungsten carbide) [12], Al₂O₃

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ohukumdar@cu.edu.tr (Ö. Hükümdar)

Geliş / Received: 13.08.2024 Kabul / Accepted: 14.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1532510

(Aluminum oxide) [13], CeO₂ (Cerium oxide) [14], SiO₂ (Silicon dioxide) [15], and others are used as reinforcement particles for metal coatings. By using different types of nanoparticles, the performance of nanocomposite coating can be positively enhanced and adjusted to be integrated into various applications [16]. A.B. Radwan et al. [17] obtained nanocomposite coatings using Ni-P/Y₂O₃ electroplating. The findings indicated that the deposition of Y₂O₃ particles on the Ni-P metal matrix exhibited superior mechanical properties. Furthermore, it was shown that the corrosion resistance of Ni-P/Y₂O₃ composite coatings was increased by up to 90.8% at 1.00 g/l Y₂O₃ bath concentrations compared to Ni-P coatings. Liu et al. [18] found that the wear resistance of Ni-P/WC composite coating was enhanced by the deposition of WC nanoparticles on a metal matrix. Furthermore, the corrosion resistance properties of the coating were also advanced by dispersing the nanoparticles in the matrix. Alirezaei et al. [19] Ni-P/Al₂O₃ composite coatings were obtained with different deposition rates. It was shown that the percentage of deposition particles, roughness, and hardness of the coating were affected by the Al₂O₃ concentration used in the bath. As a result, the average roughness and hardness values increased with adding Al₂O₃ nanoparticles. Xiao et al. [20] produced a Ni-P metal matrix alloy with a hardness of 580 HV by adding 15 g/L CeO₂ nanoparticles to the bath concentration. In recent years, zirconium dioxide (ZrO₂) as a reinforcing particle has gained wide application in industry due to its outstanding mechanical properties and chemical resistance. Its high melting point (about 2700°C) and hardness make zirconium ideal for cutting tools, abrasive materials, and durable ceramics [21]. Lehman et al. [22] synthesized Ni-W/ZrO₂ composite coatings using the electrochemical deposition method in an electroplating solution. Chemical composition, microstructure, mechanical properties, wear characteristics, and corrosion resistance of Ni-W/ZrO₂ composite coatings were optimized by changing bath parameters. In addition, the relationship between ZrO₂ powder content and current density was investigated. According to the results, the most optimum results were obtained at approximately 5 g/L zirconium nanoparticle content in the coating solution, 11 A/dm² current density, and 600 rpm cathode rotation speed. Accordingly, microhardness was 8 GPa, wear resistance was 1.4 x 10⁻⁶mm³/Nm, and corrosion resistance was 6 µA/cm². Wang et al. [23] prepared two distinct Ni-ZrO₂ nanocomposite coatings via pulsed electrodeposition (PC) and pulsed reverse electrodeposition (PRC), respectively. The findings revealed that Ni-ZrO₂ nanocomposite coatings demonstrated enhanced microhardness and superior wear resistance compared to pure nickel coatings under identical conditions. Furthermore, the wear weight losses of the PC and PRC nanocomposite coatings were found to be lower than those of the DC nanocomposite coatings. It also showed that Ni-ZrO₂ nanocomposite coatings obtained by the PRC method have superior wear resistance properties. Therefore, using ZrO₂ to enhance the mechanical and wear performance of composite coatings is among the good options [24]. In addition, there are few studies on chemically deposited Ni-P/ZrO₂ nanocomposite coatings [25-27]. Therefore, the aim

of this study, in addition to the studies conducted in other studies, is not only to investigate the effect of ZrO₂ on the structure, corrosion resistance and microhardness of Ni-P alloy coatings, but also to expand the effect of different bath concentrations and different current densities on the host matrix. In this study, Ni-P/ZrO₂ composite coating was deposited on the surface of St-37 steel by electroplating method. The effects of different ZrO₂ bath concentrations and current density on the morphology, microhardness, and wear performance of Ni-P coatings were investigated. The mechanisms of wear of the composite coating and the causes of adverse effects were subjected to analysis.

2 Material and methods

Composite coatings with Ni-P main matrix and ZrO₂ nanoparticle reinforcement were deposited on St-37 steel substrate material by electrodeposition method with a conventional watt-type nickel bath. Sodium hypophosphite was added to the bath as a phosphate source to obtain the main matrix structure. During the preparation of the samples, a 3-electrode system was used in the electrodeposition bath. Cathode, anode, and reference electrodes were placed vertically in the bath, and approximately 3 cm was determined between them. The schematic representation of the electrodeposition system is provided in Figure 1. Ultrasonic stirring was performed for 1h at room temperature to enhance the dispersion of ZrO₂ particles used in the electrodeposition solution and to prevent their possible aggregation. Vicra Cell VCX 750 brand and model was used as the ultrasonic mixer; the cycle value was set to 1, and the amplitude was set to 70% (~20 kHz).

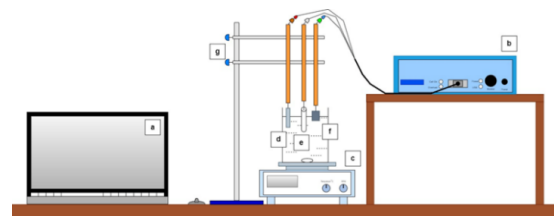


Figure 1. Electrodeposition system (a) computer (software control), (b) potentiostat/galvanostat, (c) magnetic stirrer, (d) nickel plate (anode), (e) reference electrode (Ag/AgCl), (f) St-37 (cathode), (g) stand

Ag/AgCl was used as the reference electrode, nickel plate as the anode, and St-37 steel as a cathode. Preparation of the substrate samples is one of the important processes. As the first process, the sample was sanded with 600-1200-2000# sandpapers to clean the oil, dirt, and rust layers on it. Then, the remaining area was painted with isolated paint so that 3 cm² of the substrate sample was exposed. After this process, a pure aqueous solution of 20% acetone was prepared and cleaned in an ultrasonic bath for 30 minutes and then kept in a pure aqueous solution of 10% hydrochloric acid (HCl) for 1 minute for etching. After each process, the samples were rinsed with pure water and left to dry. All experiments, including electrochemical corrosion tests, were performed with a Gamry interface 1010 E brand and model device. In the electrodeposition bath, nickel sulfate

hexahydrate ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and nickel chloride hexahydrate ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) were used as pure nickel sources, and sodium hypophosphite was used as a phosphate source. The reinforcement particle used in the composite coating bath was 40-50 nm zirconium oxide (ZrO_2) particles. The added reinforcement particles cause agglomeration and surface elevation problems in the bath. Therefore, sodium dodecyl sulfate was added to the electroplating bath and stirred with an ultrasonic mixer for 1 h before coating; the cycle value was set to 1, and the amplitude value was set to 75%. In all coating processes, 50 and 75 mA/cm^2 current density and 2 ± 0.1 pH value was used. The bath temperature was set around 65 ± 1 °C. The storage period was studied as 60 min. The working parameters and working conditions of all these experiments are given in Table 1. Code names have been assigned to the bath concentrations of nanocomposite coatings in Table 2. After the electrodeposition process was completed, it was cleaned with pure water and left to dry at room temperature.

Table 1. Bath parameters and conditions

Sq. no	Bath components (Chemicals)	Quantity
1	Nickel-Sulfate-Hexahydrate	240 g/L
2	Nickel-Chloride-Hexahydrate	15 g/L
3	Sodium Hypophosphite	20 g/L
4	Boric Acid	30 g/L
5	Sodium Chloride	15 g/L
6	Phosphoric Acid	6 g/L
7	Zirconium Oxide	0-10-20 g/L
8	Sodium dodecyl sulfate (SDS)	0.5 g/L
9	Saccharin	2 g/L
Sq. no	Bath conditions	Parameters
1	Electrolyte Bath pH	2 ± 0.1
2	Temperature	65 ± 0.2 °C
3	Shaking the Bath Using a Magnetic Stirrer	300 ± 50 rpm
4	Time (Coating deposition)	60 minutes
5	DC Current Density	50-75 mA/cm^2

Table 2. Code names

Current Density (mA/cm^2)	Parameters		Code Names
	ZrO ₂ (g/L)		
50	0		50NiP0Z
50	10		50NiP10Z
50	20		50NiP20Z
75	0		75NiP0Z
75	10		75NiP10Z
75	20		75NiP20Z

For the surface analysis, images were taken using a hand microscope of the Dino-Lite AM7115MZT brand and model. The magnification capacity of the device was set to 250x. An AOB LAB brand and model device was used for microhardness measurements. Samples with dimensions of $20 \times 20 \times 1.5$ mm³ were used for the hardness test. A 500 g load was applied to each sample from 10 different points for 10 seconds to obtain the hardness value. The average of these values obtained was taken and accepted as the Vickers hardness value. A UTS Tribology brand wear analyzer was used for wear tests. The device can perform tests in accordance with ASTM-G99, ASTM-G133, DIN-50324, and other standards related to modules. Analyzes were

carried out using the alternative motion test module with the ball on disk method. 100Cr6 stainless steel was used as the ball material and the diameter of the ball was 6 mm. The test was applied under a 2 N load and was carried out at a speed of 2 Hz. In the wear test performed at room temperature, the scar diameter was set as 10 mm, and the analysis was completed with 2500 cycles.

3 Result and discussion

3.1 Morphological analysis

Figure 2 shows the images of Ni-P/ZrO₂ composite coatings prepared with pure nickel and different bath concentrations using an optical hand microscope at 250x magnification. It can be said that the surface morphologies of pure nickel and Ni-P alloy coatings are smoother than other coatings. It is observed that Ni-P/ZrO₂ nanocomposite coatings have a rough surface. It can be said that this situation is due to the distribution of ZrO₂ particles accumulated in the main matrix of the coating. In addition, it is clearly seen on the surface morphology at different current densities. As the current density increases, the structure of the pits formed on the surface grows and disperses. Hosseini et al. [28] investigated the surface morphology of Ni-B/WC composite coatings obtained by electroplating. It was stated that the Ni-B coating has a highly smooth and compact structure, whereas the Ni-B/WC (4 g/L) nanocomposite coating has a porous spherical structure with gaps between clusters, which are known as cauliflower structures. Ünal et al. [29] obtained Ni-B/TiB₂ nanocomposite coatings using the electrodeposition method. In the images obtained with an optical microscope, it was found that the surface morphology of the coatings was generally smooth. However, Ni-B/TiB₂ nanocomposite coating obtained a rougher surface than pure nickel and Ni-B alloy. When the obtained results are compared with the literature, it is revealed that the addition of reinforcement particles to the main matrix affects the surface morphology, and the results are parallel to the literature [30-32].

3.2 Microhardness analysis

In Figure 3, the microhardness results of pure nickel, Ni-P alloy, and Ni-P/ZrO₂ nanocomposite coatings obtained by the electroplating method at different bath concentrations and current densities are given together. A pure nickel sample was also produced for comparison purposes. While pure nickel hardness was measured as 324 HV, Ni-P alloy was measured as 328 and 335 HV. When ZrO₂ reinforcement particles were added to Ni-P alloy, it varied between 429 and 456 HV. This situation causes a 40.74% increase compared to pure nickel and a 36.12% increase compared to Ni-P alloy in the hardness analysis of the ZrO₂ reinforcement particle. When compared in terms of current density, the hardness value of the composite coatings produced with a current density of 75 mA/cm^2 is higher than the composite coatings produced with a current density of 50 mA/cm^2 . According to these results, increasing the bath concentration amount of ZrO₂ reinforcement particle and increasing the current density significantly affected the hardness results.

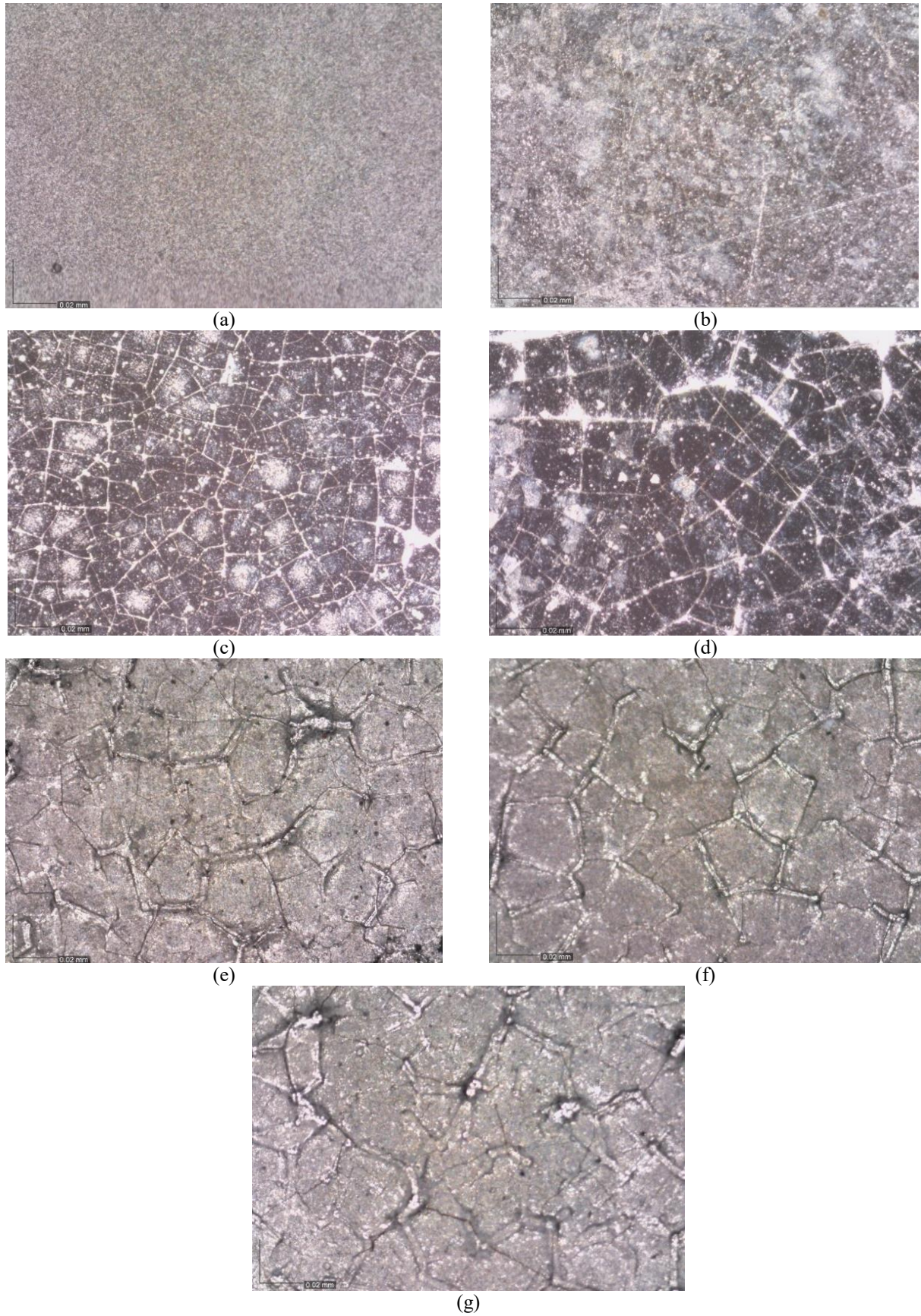


Figure 2. Optical microscope images of coatings (a) Pure nickel, (b) 50NiP0Z, (c) 50NiP10Z, (d) 50NiP20Z, (e) 75NiP0Z, (f) 75NiP10Z, (g) 75NiP20Z

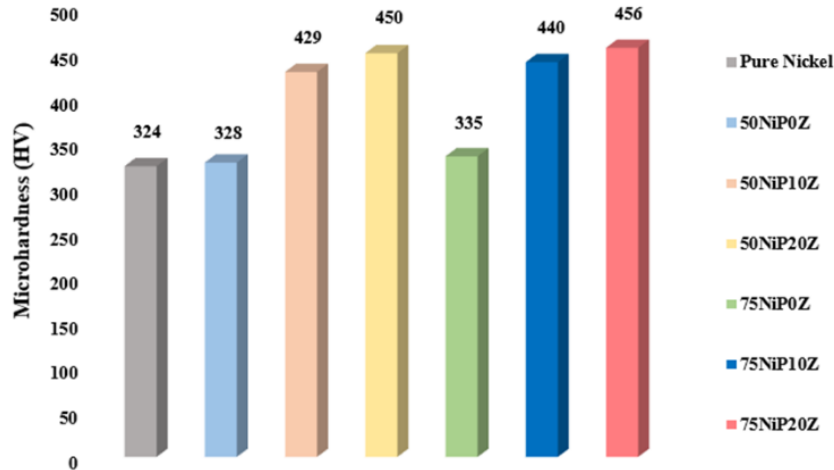


Figure 3. Microhardness values

When the literature is examined, Fayyaz et al. [33] obtained Ni-P/TiC nanocomposite coatings in their studies. Upon examination of the Vickers microhardness and nanoindentation results, the highest recorded microhardness value was found to be 593 HV. It is shown that the hardness increases with the increase in the amount of TiC particles. As seen in the literature, it has been observed that the microhardness of the coating increases up to a certain point by adding the reinforcement particle to the main matrix [34, 35]. When the microhardness of the coatings obtained by the electroplating method is compared in terms of current densities, the coatings produced with 75 mA/cm² show very close values to the coatings produced with 50 mA/cm², but higher hardness values are obtained. This situation can be considered as accumulating more metal particles by the current sent to the sample. Our study is at the same point as the literature on this subject. Doğan et al. [36] observed an increase in microhardness of the Ni-B alloy coating among the coatings produced when the current density was increased from 1.5 A/dm² to 4.5 A/dm². Furthermore, the observed increase in hardness can be attributed to the particle's ability to impede dislocation movement, thereby contributing to enhanced resistance against plastic deformation.

3.3 Wear analysis

Wear analyses were performed on pure nickel, Ni-P alloy coating, and Ni-P/ZrO₂ composite coatings. Figures 4 and 5 show friction coefficient graphs and average friction coefficient values.

When the friction coefficient and average friction coefficient graphs are evaluated, it is seen that the nanocomposite coating exhibits lower friction coefficient values than pure nickel. The highest average friction coefficient results were obtained with the pure nickel sample as 0.63 microns, while the lowest average value was obtained with 0.2 microns in the 50NiP20Z coded composite coating. Based on this, while the hardness value increased with the addition of reinforcement nanoparticles to the main matrix, it caused a decrease in the friction coefficient value. In the graph given in Figure 4, it is seen that pure nickel oscillated less than other composite coatings during the test period.

While the maximum friction coefficient value of pure nickel was 0.7 microns, the lowest friction coefficient result was seen at 0.65 microns. When the Ni-P alloy coded 50NiP0Z was examined, the maximum friction coefficient value was seen at 0.32 microns levels, while the lowest friction coefficient result was found to be around 0.15 microns. The reason for this is that the friction coefficient value of alloy and composite coatings started low at first and then increased after the sliding layer was deformed. During the wear of the adhered layer, the friction coefficient results first increase and reaches the maximum result, and the friction coefficient value suddenly decreases as the adhered layer breaks.

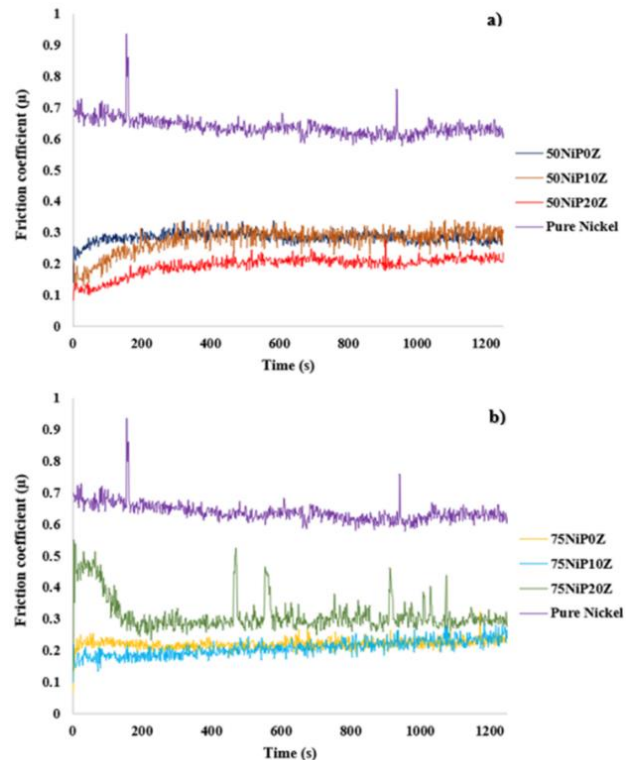


Figure 4. Friction coefficient graph of samples produced with (a) 50 mA/cm² current density (b) 75 mA/cm² current density

The average friction coefficient values of the coatings obtained with different current densities are given in Figure 5.

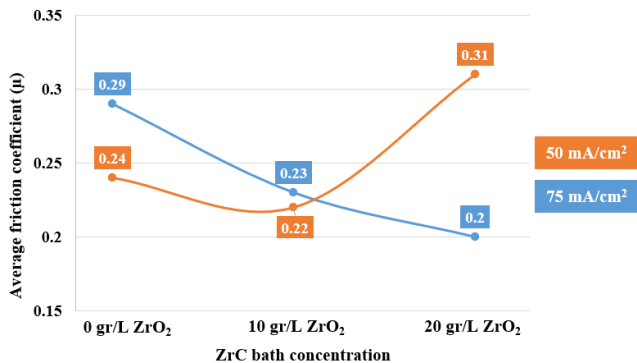


Figure 5. Average friction coefficient results

When the graph is examined, the average friction coefficient values of the coatings obtained with 50 mA/cm² current density are generally lower than those of the coatings obtained with 75 mA/cm² current density. Only Ni-P/ZrO₂ composite coatings produced at 20 g/L ZrO₂ bath concentration showed a contrasting picture compared to coatings produced at other bath concentrations. The reason for this can be explained by the fact that the ZrO₂ particle does not dive well in the bath. Ünal et al. [29] deposited Ni-B/TiB₂ composite coatings on the surface of AISI 304 steel. The analysis of the wear resistance of the coatings revealed that the coatings demonstrated superior performance compared to pure nickel and the Ni-B alloy coating. While the average friction coefficient result was found to be 0.227 microns for pure nickel, it was found to be 0.187 microns for composite coatings. It is clearly seen that adding TiB₂ reinforcement particles to the main matrix increases the wear resistance. Allahyarzadeh et al. [37] conducted pin-on-disc wear tests to examine the wear performance of the Ni-W coatings performed. The results showed that the obtained coating showed superior wear resistance compared to pure nickel. In addition, the friction coefficient decreased from 0.74 to 0.49 microns with the increase in sliding distance. When looking at the literature, it is seen that adding the abrasion resistance reinforcement particle to the main matrix provides significant abrasion resistance.

4 Conclusion

The optical microscope, microhardness, and wear analysis of Ni-P/ZrO₂ composite coatings obtained by the electrodeposition method using pure nickel, Ni-P alloy, and different bath concentrations and current densities were evaluated comparatively.

- When the surface morphologies of the obtained coatings were examined, coatings with generally smooth surfaces were obtained. With the addition of ZrO₂ nanoparticles to the main matrix, a rougher surface is observed compared to other coatings.

- With the addition of ZrO₂ reinforcement particles, approximately 1.4 times higher microhardness values were found compared to pure nickel and 1.3 times higher than Ni-

P alloy. Additionally, an increase in microhardness value was detected with increasing current density.

- When the wear analysis results were examined, composite coatings had an average wear coefficient of 68.25% less than pure nickel and 31.03% less than Ni-P alloy.
- The ZrC reinforcement particle added to the bath concentrate provided superior properties to the composite coatings in terms of surface morphology, hardness and wear performance.

The results obtained from this study show that Ni-P/ZrO₂ composite coatings obtained by the electroplating method are potentially useful in industrial applications and provide enrichment of the literature.

Conflict of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Similarity rate (iThenticate): % 14

References

- [1] S. Tan, B. Song, H. Chen, X. Tan, R. Qiu, T. Liu, N. Guo, and S. Guo, Excellent strengthening of low-carbon steel by severe free-end torsion. *Metals and Materials International*, 29, 2197–2206, 2023. <http://doi.org/10.1007/s12540-022-01369-4>.
- [2] E. G. Astafurova, S. V. Dobatkin, E. V. Naydenkin, S. V. Shagalina, and G. G. Zakharova, Microstructural characterization of low-carbon steel processed by high pressure torsion and annealing. *Materials Science Forum*, 649–654, 2008. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.584-586.649>
- [3] J. T. Wang, C. Xu, Z. Z. Du, G. Z. Qu, and T. G. Langdon, Microstructure and properties of a low-carbon steel processed by equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering*, 410–411, 312–315, 2005. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.111>.
- [4] G. A. El-Awadi, Review of effective techniques for surface engineering material modification for a variety of applications. *AIMS Materials Science*, 10(4), 652–692, 2023. <http://doi.org/10.3934/matersci.2023037>.
- [5] H. Kır and S. Apay, Elektrolitik yöntemle sert krom kaplanan yapı çeliğinde kaplama parametrelerinin taguchi metodu ile optimizasyonu. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 7–14, 2020. <http://doi.org/10.17714/gumusfenbil.540183>.
- [6] F. Mindivan, K. Aydın, and H. Mindivan, Elektrolitik kaplanmış nikel/grafen kompozit kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 29–36, 2019. <http://doi.org/10.17100/nevbiltek.633289>.
- [7] X. Fu, F. Wang, X. Chen, J. Lin, and H. Cao, Corrosion resistance of Ni-P/SiC and Ni-P composite coatings prepared by magnetic field-enhanced jet electrodeposition. *RSC Advances*, 10(56), 34167–34176, 2020. <http://doi.org/10.1039/d0ra06735k>.
- [8] J. Zhang, Z. Zhang, Y. Wu, D. Kong, S. Yang, S. Sun and S. Gu, Corrosion resistance improvement of Ni-P

- coatings: surface cracks with different temperatures repaired by laser remelting. *Journal of Materials Engineering Performance*, 2024. <http://doi.org/10.1007/s11665-024-09264-2>.
- [9] A. Lelevic and F. C. Walsh, Electrodeposition of Ni-P composite coatings: A review. *Surface and Coating Technology*, 378, 124803, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.027>.
- [10] H. Nazari, G. Barati Darband, and R. Arefinia, A review on electroless Ni-P nanocomposite coatings: effect of hard, soft, and synergistic nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 58, 4292-4358, 2023. <http://doi.org/10.1007/s10853-023-08281-1>.
- [11] Y. Abdesselam, I. Rezgüi, M. Naoun, A. Belloufi, M. Mezoudj, and D. Zerrouki, Experimental investigation and optimization of manufacturing processes of Ni-P-Y2O3 composite coatings by multiple linear regression method based on genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(9-10), 3995-4019, 2023. <http://doi.org/10.1007/s00170-023-11342-z>.
- [12] Z. A. Hamid, S. A. El Badry, and A. A. Aal, Electroless deposition, and characterization of Ni-P-WC composite alloys. *Surface and Coating Technology*, 201(12), 5948-5953, 2007. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.001>.
- [13] R. Hu, Y. Su, Y. Liu, H. Liu, Y. Chen, C. Cao and H. Ni, Deposition process and properties of electroless Ni-P-Al2O3 composite coatings on magnesium alloy. *Nanoscale Research Letters*, 13, 198, 2018. <http://doi.org/10.1186/s11671-018-2608-0>.
- [14] H. M. Jin, S. H. Jiang, and L. N. Zhang, Microstructure and corrosion behavior of electroless deposited Ni-P/CeO2 coating. *Chinese Chemical Letters*, 19(11), 1367-1370, 2008. <http://doi.org/10.1016/j.cclet.2008.06.040>.
- [15] D. Dong, X. H. Chen, W. T. Xiao, G. B. Yang, and P. Y. Zhang, Preparation and properties of electroless Ni-P-SiO2 composite coatings. *Applied Surface Science*, 255(15), 7051-7055, 2009. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.03.039>.
- [16] Y. Wang, B. Li, D. Zhang and S. Si, Influence of ZrB2 nanoparticles on microstructure and mechanical properties of Ni-Co coating. *Coating*, 14(11), 1428, 2024.
- [17] A. Bahgat Radwan, K. Ali, R.A. Shakoor, H. Mohammed, T. Alsalama, R. Kahraman, M. M. Yusuf, A. M. Abdullah, M. Fatima Montemor and Mohamed Helal, Properties enhancement of Ni-P electrodeposited coatings by the incorporation of nanoscale Y2O3 particles. *Applied Surface Science*, 457, 956-967, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.241>.
- [18] Y. Y. Liu, J. Yu, H. Huang, B.H. Xu, X.L. Liu, Y. Gao and X.L. Dong, Synthesis and tribological behavior of electroless Ni-P-WC nanocomposite coatings. *Surface and Coating Technology*, 201(16-17), 7246-7251, 2007. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.035>.
- [19] S. Alirezai, S. M. Monirvaghefi, M. Salehi, and A. Saatchi, Wear behavior of Ni-P and Ni-P-Al2O3 electroless coatings. *Wear*, 262(7-8), 978-985, 2007. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2006.10.013>.
- [20] X. W. Zhou, Y. F. Shen, H. M. Jin, and Y. Y. Zheng, Microstructure and depositional mechanism of Ni-P coatings with nano-ceria particles by pulse electrodeposition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(8), 1981-1988, 2012. [http://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61417-9](http://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61417-9).
- [21] G. Şahin and S. Gökteş, Calculations of structural parameters and optical constants of size dependent ZrO2. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 10(1), 114-124, 2024. <http://doi.org/10.30855/gmbd.0705N10>.
- [22] E. Beltowska-Lehman, P. Indyka, A. Bigos, M. J. Szczerba, and M. Kot, Ni-W/ZrO2 nanocomposites obtained by ultrasonic DC electrodeposition. *Materials & Design*, 80, 1-11, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.04.049>.
- [23] W. Wang, F. Y. Hou, H. Wang, and H. T. Guo, Fabrication and characterization of Ni-ZrO2 composite nano-coatings by pulse electrodeposition. *Scripta Materialia*, 53(5), 613-618, 2005. <http://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.04.002>.
- [24] R. A. Shakoor, R. Kahraman, U. S. Waware, Y. Wang, and W. Gao, Properties of electrodeposited Ni-B-ZrO2 composite coatings. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(3), 2110-2119, 2015. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)04833-2](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)04833-2).
- [25] M. F. Tan, W. C. Sun, L. Zhang, Q. Zhou, and J. Ding, High-temperature oxidation resistance of electroless Ni-P-ZrO2 composite coatings. *Materials Science Forum*, 686, 569-573, 2011. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.686.569>.
- [26] P. Makkar, R. C. Agarwala, and V. Agarwala, Morphological and hardness studies of electroless Ni-P-ZrO2 nanocomposite coatings on mild steel. *Advanced Materials Research*, 585, 478-482, 2012. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.585.478>.
- [27] Y. Wang, X. Shu, S. Wei, C. Liu, W. Gao, R.A. Shakoor and R. Kahraman, Duplex Ni-P-ZrO2/Ni-P electroless coating on stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 630, 189-194, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.064>.
- [28] M. G. Hosseini, S. Ahmadiyeh, and A. Rasooli, Pulse plating of Ni-B/WC nanocomposite coating and study of its corrosion and wear resistance. *Materials Science and Technology*, 35(10), 1248-1256, 2019. <http://doi.org/10.1080/02670836.2019.1619292>.
- [29] E. Ünal, A. Yaşar and İ. H. Karahan, Elektrokimyasal depolama yöntemi ile AISI 304 çeliği yüzeyine biriktirilen Ni-B/TiB2 kompozit kaplamaların kristal yapı ve bazı mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4), 847-860, 2021. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.104032>
- [30] H. Liu, H. Wang, W. Yu, Y. He, F. Xia, C. Ma, and Azar Shakoor, Effect of TiN concentration on



- microstructure and properties of Ni/W–TiN composites obtained by pulse current electrodeposition. *Ceramics International*, 47(17), 24331–24339, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.145>.
- [31] E. Ünal, A. Yaşar, and İ. H. Karahan, Elektrodolanmış nanokompozit kaplamalarda elektrolit bileşenlerinin etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 35(1), 159-171, 2020. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.764753>
- [32] H. H. Sheu, P. C. Huang, L. C. Tsai, and K. H. Hou, Effects of plating parameters on the Ni-P-Al₂O₃ composite coatings prepared by pulse and direct current plating. *Surface and Coating Technology*, 235, 529–535, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.020>.
- [33] O. Fayyaz, A. Khan, R. A. Shakoor, A. Hasan, M. M. Yusuf, M. F. Montemor, S. Rasul, K. Khan, M. R. I. Faruque and P. C. Okonkwo, Enhancement of mechanical and corrosion resistance properties of electrodeposited Ni–P–TiC composite coatings. *Scientific Reports*, 11(1), 2021. <http://doi.org/10.1038/s41598-021-84716-6>.
- [34] S. Sadreddini, S. Rahemi Ardakani, and H. Rassaei, Corrosion Behavior and Microhardness of Ni-P-SiO₂-Al₂O₃ Nano-composite Coatings on Magnesium Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(5), 2032–2039, 2017. <http://doi.org/10.1007/s11665-017-2632-8>.
- [35] Y. Zhou, S. Zhang, Lin-lin Nie, Ze-jie Zhu, Jian-qing Zhang, Fa-he Cao and Jun-xi Zhang, Electrodeposition and corrosion resistance of Ni–P–TiN composite coating on AZ91D magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(11), 2976–2987, 2016. [http://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64428-X](http://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64428-X).
- [36] F. Doğan, M. Uysal, H. Algül, E. Duru, H. Akbulut, and S. Aslan, Optimization of pulsed electro co-deposition for Ni-B-TiN composites and the variation of tribological and corrosion behaviors. *Surface and Coating Technology*, 400, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126209>.
- [37] M. H. Allahyarzadeh, M. Aliofkhaeaei, A. R. Rezvanian, V. Torabinejad, and A. R. Sabour Rouhaghdam, Ni-W electrodeposited coatings: Characterization, properties and applications. *Surface and Coating Technology*, 307, 978-1010, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.052>.





Demir katkılı zeolitik imidazol ağ yapısı katalizörler kullanılarak fenton benzeri oksidasyonu ile kristal viyole gideriminde reaksiyon parametrelerinin ve kinetiğinin incelenmesi

Investigation of reaction parameters and kinetics for crystal violet removal by fenton-like oxidation using iron-doped zeolitic imidazole framework catalysts

Esra Yılmaz Mertsoy^{1,*} , Burcu Palas² 

¹ Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Çankırı, 18100, Türkiye

² Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İzmir, Türkiye

Öz

Kristal Viyole (KV), tekstil ve kâğıt endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan sentetik bir boyadır. Bu boya, çevreye atıldığında su kaynaklarında kalıcı kirliliğe yol açabilir, biyolojik olarak parçalanması zordur ve toksik etkileri nedeniyle sucul yaşamı olumsuz etkiler. Bu nedenle, KV'nin su kaynaklarından etkin bir şekilde giderilmesi büyük önem taşır. KV'nin giderimi, çevre sağlığının korunması, ekosistem dengesinin sürdürülebilmesi ve insan sağlığının olumsuz etkilenmesinin önlenmesi açısından kritik bir konudur. Bu çalışmada Demir yüklü ZIF-8 sentezi gerçekleştirilmiştir (Fe/ZIF-8). Zeolit imidazol ağ yapıları, yüksek kimyasal stabilite ve esneklik sergileyen ve reaksiyonlarda, gaz ayırma ve saflaştırma, gibi uygulamalarda kullanılan çok sağlam yapıya sahip gözenekli koordinasyon polimerleridir. Düşük üretim maliyetleri, kolay sentez yöntemleri ve işlevselleştirilebilirliği nedeniyle atık su arıtım proseslerinde kullanılmak üzere zeolit imidazol ağ yapıları seçilmiştir. Sentezlenen Fe yüklü ZIF-8 Fenton benzeri oksidasyonu yöntemi ile atık sulardan KV uzaklaştırılmasında kullanılmıştır. Fenton benzeri oksidasyonunda Fe-ZIF-8 kullanımı ile 60 dakikada %99.6 KV giderimi sağlanmış ve gerçekleştirilen kinetik çalışmalarda boya gideriminin birinci mertebeden reaksiyon kinetiğine uyduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kristal viyole, Zeolitik imidazol ağ yapısı, Fenton, ZIF-8

1 Giriş

Tekstil endüstrisi atık sularının renginin giderilmesi için etkili arıtma yöntemlerinin ve katalizörlerin geliştirilmesi önem taşımaktadır. Boyalar düşük konsantrasyonlarda bile oldukça görünürdür. Su kütlelerinde boyaların bulunması, ışığın suya nüfuzunu etkiler ve su florasının fotosentetik aktivitesini azaltır. Bazı boyaların metalleme nedeniyle atık sudaki ağır metallerin çevresel etkisi de önemli bir endişe kaynağıdır [1]. Boyar maddelerin su ortamına boşaltılması, bazı boyaların genotoksik, mutajenik ve

Abstract

Crystal Violet (CV) is a synthetic dye widely used in the textile and paper industries. This dye can cause permanent pollution in water resources when discharged into the environment, is difficult to biodegrade and adversely affects aquatic life due to its toxic effects. Therefore, effective removal of CV from water resources is of great importance. Removal of CV is a critical issue in terms of protecting environmental health, maintaining ecosystem balance and preventing negative effects on human health. In this study, the synthesis of Iron-loaded ZIF-8 (Fe/ZIF-8) was carried out. Zeolite imidazole network structures are porous coordination polymers with very robust structures that exhibit high chemical stability and flexibility and are used in applications such as reactions, gas separation and purification. Zeolite imidazole network structures were selected for use in wastewater treatment processes due to their low production costs, easy synthesis methods and functionalizability. The synthesized Fe-loaded ZIF-8 was used in the removal of CV from wastewater by Fenton-like oxidation method. 99.6% CV removal was achieved in 60 min by using Fe-ZIF-8 in Fenton-like oxidation and the performed kinetic studies determined that the dye removal obeyed the first-order reaction kinetics.

Keywords: Crystal violet, Zeolitic imidazolate framework, Fenton, ZIF-8

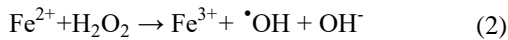
kanserojen etkilerinden dolayı endişe yaratmaktadır. Boyalar genel olarak memelilere karşı düşük toksisiteye sahip olsa da biyolojik bozunma sırasında oluşan aromatik aminler gibi dönüşüm ürünleri zararlı olabilir [2].

Boyalar zamanla ayrışmaya, güneş ışığına maruz kalmaya, oksitleyici maddelere, seyreltilmiş asitlere, deterjanlara ve sabunlara dayanacak şekilde tasarlandığından, karmaşık kimyasal yapıları ve sentetik kökenleri nedeniyle geleneksel arıtma işlemleriyle kolayca giderilemezler [3,4].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esrayilmaz@karatekin.edu.tr (E. Yılmaz)
Geliş / Received: 23.08.2024 Kabul / Accepted: 14.10.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1537619

KV, canlıların ve çevrenin sağlığını tehdit eden kalıcı bir organik boyadır. Mor renkli bu kimyasal bileşik, tekstil ve kağıt endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır, ancak su kaynaklarına karıştığında biyolojik olarak parçalanması zor hale gelir ve ciddi kirlilik sorunlarına yol açar. Bu durum, KV'nin su ortamlarından etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını gerekli kılar. KV'nin giderilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Adsorpsiyon [5], koagülasyon-flokülasyon [6] ve ileri oksidasyon prosesleri [7] gibi teknikler, KV'nin su ortamlarından temizlenmesinde etkili çözümler sunar. İleri oksidasyon yöntemleri ile inatçı organik bileşiklerin tamamen detoksifikasyonunu ve mineralizasyonunu sağlanabilmektedir. İleri oksidasyon prosesleri, hidroksil radikalleri ($\text{OH}\cdot$), süperoksit radikalleri ($\text{O}_2^{\cdot-}$) ve sülfat radikalleri ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) dahil olmak üzere reaktif oksijen türlerinin üretilmesine dayanır [8]. İleri oksidasyon proseslerinin başlıca avantajları; kirleticilerin tam mineralizasyonu, zararsız son ürünler, geleneksel yöntemlere dirençli refrakter bileşiklerin bozunmasında etkili olma, yüksek derecede toksik atıksuların arıtımında kullanılması ve diğer arıtım yöntemleri ile entegre edilebilmesidir [9]. İleri oksidasyon proseslerinde açığa çıkan hidroksil, süperoksit ve sülfat radikali gibi çeşitli reaktif türler seçici olmaksızın geniş bir yelpazedeki organik kirleticileri su, karbondioksit ve basit inorganik tuzlara dönüştürmektedir [10]. Bu radikallerden sülfat radikali ($\text{SO}_4^{\cdot-}$), yüksek redoks potansiyeli ve uzun yarılanma süresi ile organik madde gideriminde etkili olmaktadır. $\text{SO}_4^{\cdot-}$ üretilen ileri oksidasyon prosesleri son yıllarda toksik inatçı organik kirleticilerin iyileştirilmesinde artan bir ilgi görmektedir.

Demir içeren katalizörler varlığında hidrojen peroksitin katalitik parçalanması ile hidroksil radikali açığa çıkaran Fenton ve Fenton benzeri oksidasyonu prosesleri (Denklemler 1 ve 2) en düşük maliyetli ve en kolay uygulanabilir ileri oksidasyon proseslerindedir [11].



Katalizör kullanımı dışındaki ileri oksidasyon yöntemlerinin yüksek enerji tüketimi su arıtma için pratik uygulamaları kısıtlamaktadır. Bu nedenle, radikal üretimi için yüksek verimli ve çevre dostu katalizörlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Metal-organik ağ yapıları (MOF), yüksek yüzey alanı ve geniş gözeneklilik gibi özellikleri ile dikkat çeken bir malzeme ailesidir. Organik bağlayıcılar, yalnız elektronlarını metal iyonlara verebilirken, metal iyonlar da bu elektronları kabul ederek metal organik ağ yapılarını oluşturmaktadır. Kolay üretilmesi, yüksek yüzey alanı, işlevselleştirilebilirlik ile özelliklerinin değiştirilebilir olması avantaj sağlamaktadır. MOF'ların sentez sonrası işlevselleştirilmesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri iyileştirmeye yönelik etkili ve çok yönlü bir strateji olarak bilinmektedir.

MOF'lar, sonsuz dizide koordine olabilen organik bağlayıcıların metal iyonlarına köprü bağlanması ile oluşan yapılardır. Metal organik ağ yapılarının özelliklerini

etkileyen en önemli faktörler metal iyonları ile organik bağlayıcılardır. Oldukça düzenli, kristal yapıdaki bu malzemenin en belirgin avantajı istenilen özellikte moleküler boşluklar oluşturmaya elverişli olmasıdır. Çok düşük yoğunluklu, gözenekli kristal yapıdaki bu bileşiklerin çok büyük yüzey alanları vardır [12, 13]. Günümüzde 3000'den fazla bileşiği bulunan MOF'ların 1 gramı 6000 metrekare yüzey alanına sahiptir. Geçiş metalleri (Cu, Zn), toprak metalleri (Sr, Ba) blok elementleri (In, Ga) MOF sentezinde kullanılmaktadır.

MOF'ların çok yönlü yapısının, modifikasyonları için önemli bir rol oynadığı öngörülmektedir. Özellikle zeolitik imidazolat çerçeveler (ZIF'ler), geçiş metalleri ve imidazolat bağlayıcılara dayanan ve MOF'ların bir alt ailesi olarak çok gözenekli yapıları, homojen gözenek boyutları, yüksek termal ve kimyasal dayanıklılık ve zeolit benzeri özellikleri nedeniyle yeni bir gözenekli malzeme türü olarak ortaya çıkmıştır [14]. ZIF-8, MOF ailesine ait bir malzemedir ve Zn(II) iyonları ile 2-metilimidazolat ligandlarının birleşiminden oluşur [14]. Zeolit imidazolat ağ yapıları, yüksek kimyasal stabilite ve esneklik sergileyen ve reaksiyonlarda, gaz ayırma ve saflaştırma, gibi uygulamalarda kullanılan çok sağlam yapıya sahip gözenekli koordinasyon polimerleridir (MOF). Bu özellikler, onları adsorpsiyon ve kataliz gibi çevre dostu uygulamalarda ideal hale getirir. ZIF-8'in demir ile modifiye edilmesi, bu malzemenin Fenton oksidasyonunda kullanılabilirliğini artırır. Demir yüklü ZIF-8, demir iyonlarının daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlar ve bu da hidroksil radikallerinin üretimini artırır. Sonuç olarak, KV gibi zor parçalanan bileşenlerin daha etkin ve hızlı bir şekilde oksitlenmesini sağlar. Ayrıca, ZIF-8'in yapısal kararlılığı ve yeniden kullanılabilirliği, bu malzemenin sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm olarak tercih edilmesini sağlar.

Literatürde KV gideriminde çeşitli malzemelerin ve çeşitli giderim yöntemlerinin etkinliğini incelenmiştir. Duan vd. (2019) [15] Mn-bazlı MOF kullanılarak KV adsorpsiyonu çalışmışlar ve 5 dakika sonunda % 70'lik KV giderimi gerçekleştirmişlerdir. Zhou ve Zhang (2016) [16], selüloz bazlı adsorbanların KV giderimindeki etkisi araştırmıştır ve bu malzemelerin çevre dostu bir alternatif olduğu gösterilmiştir. KV için maksimum adsorpsiyon kapasitesi 50 °C'de 218.82 mg.g-1 olarak bulunmuştur. Rahmat vd. (2019) [17] MnO₂/NF katalizörü kullanarak fotokatalitik KV giderimi çalışmışlar ve en iyi fotokatalitik performans, görünür ışık altında ve 90 dakika sonunda %97 olarak bulmuşlardır. Chen vd. (2011) [18] demir oksit kaplı granül aktif karbonun (FeGAC) varlığının KV'nin giderilmesi için H₂O₂'nin oksidatif reaksiyonunu incelemişlerdir. pH 3 deney koşulunda %71 KV giderimi sağlanmıştır. Huand vd. (2020) [19] ultraviyole/persülfat (UV/PS) işlemi ile KV bozunumu araştırılmıştır. KV bozunma verimliliği %91.6 olarak saptanmıştır. Wu vd. (2023) [20] sünger yapıdaki fıstık kabuğu karbon nanokompozitine Fe ekleyerek elde ettikleri Fe/SPSC katalizörünü kullanarak %95.5 KV bozunma oranı elde etmişlerdir

Bu çalışmada insan ve çevre sağlığını tehdit eden endüstriyel kirleticilerin atıksulardan etkili ve çevre dostu

arıtım sistemleri ile uzaklaştırılabilmesi için demir yüklü metal organik ağ yapısında katalizör hazırlanarak en uygun maliyetli ve kolay uygulanabilir ileri oksidasyon proseslerinden Fenton benzeri oksidasyonunda kullanılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde demir katkılı zeolitik imidazol ağ yapısında katalizörler kullanılarak Fenton benzeri oksidasyonu prosesinde gideriminin incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, gerçekleştirilen çalışma kapsamında Fe/ZIF-8 malzemesinin KV gideriminde katalitik aktivitesinin incelenmesi, katalizör yüklemesi, oksidan dozajı ve sıcaklık gibi reaksiyon parametrelerinin etkileri araştırılarak en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi ve kinetik çalışmalarda Fe/ZIF-8 varlığında KV oksidasyonunu açıklayan reaksiyon hız modelinin türetilmesi bu çalışmanın özgün yönlerini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen kinetik veriler boyar madde içeren atık suların yenilikçi katalizörler kullanılarak arıtımında pilot veya daha büyük ölçekli reaktör sistemlerinin geliştirilmesi için alt yapı oluşturmaktadır. Çalışma bu yönüyle metal organik ağ yapısında katalizörlerin çevre dostu katalitik proseslerde kullanımı alanındaki literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Fenton oksidasyonunda demir yüklü ZIF-8 kullanımı, geleneksel Fenton prosesine göre çeşitli avantajlar sunar. ZIF-8, metal-organik çerçeveler (MOF'lar) ailesinden bir malzeme olarak yüksek yüzey alanı ve gözenekliliği ile bilinir. Bu özellikler, ZIF-8'in demir iyonları ile modifiye edilmesi durumunda, demir iyonlarının daha homojen bir şekilde dağılmasına ve daha geniş bir yüzeyde aktif hale gelmesine olanak tanır. Bu durum, Fenton reaksiyonu sırasında daha fazla hidroksil radikali üretimine yol açar, böylece organik kirleticilerin, özellikle KV gibi zor parçalanabilen bileşiklerin, daha etkin ve hızlı bir şekilde oksitlenmesini sağlar. Literatürde AgCe@ZIF-67 katalizör ile Fenton benzeri oksidasyonunda sırasıyla 50 ve 109 dakika içerisinde %94 Rhodamin B ve %96 kristal viyole boya giderimi elde edilmiştir [21]. Assila vd. (2023) ZIF-8 nanopartiküllerini farklı demir türleriyle (Fe^{2+} veya Fe_3O_4) modifiye ederek Fenton benzeri oksidasyonunda tartrazin giderimi performanslarını test etmişlerdir. En iyi katalizör olarak belirlenen Fe/ZIF-8 ile %66.5 tartrazin giderimi sağlanmıştır [22]. Yine Fenton benzeri oksidasyonunda CuCo-ZIF katalizörü varlığında metilen mavisi ve metil turuncusu giderimi çalışılmış ve tamamen giderimi için gerekli reaksiyon sürelerini sırasıyla 100 ve 60 dakika olarak belirlenmiştir [23].

Bu çalışma kapsamında Fe metal katkısı ile hazırlanan ZIF-8 metal organik ağ yapısındaki katalizörlerin Fenton benzeri oksidasyonu ile KV boyar maddesi giderim performansları incelenmesi amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Kimyasallar

Çinko nitrat heksahidrat ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, Sigma-Aldrich), demir sülfat heptahidrat ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, Sigma), 2-metilimidazol ($C_4H_6N_2$, Sigma - Aldrich), Metanol (CH_3OH , Merck) katalizör sentezinde kullanılmıştır. Kristal Viyole ($C_{25}N_3H_{30}Cl$, Sigma -Aldrich) kirletici boya olarak

kullanılmıştır, Hidrojen peroksit (H_2O_2 , Merck) oksidasyon amacıyla kullanılmıştır.

2.2 Fe katkılı ZIF-8 (Fe/ZIF-8) sentezi

1.5 g $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ve 75 mg $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 70 mL metanolde çözüldü (çözelti A) ve 3.3 g 2-metilimidazol, 70 mL metanolde çözüldü (çözelti B). 30 dakika karıştırıldıktan ve homojen bir çözelti elde edildikten sonra, çözelti B yavaşça çözelti A'ya eklenerek karışık bir çözelti oluşturulmuştur. Karışım daha sonra oda sıcaklığında 3 saat boyunca karıştırılmıştır. Bundan sonra, kombinasyon bir gün boyunca iç mekân ortamında dinlendirilmiştir. Son olarak, katı madde, emülsiyon 8000 rpm'de santrifüj edildikten sonra yüksek saflıkta metanol kullanılarak 3 kez yıkanmıştır [24]. Daha sonra numune $100^\circ C$ 'de 12 saat kurutulmuş ve Fe-ZIF-8 olarak adlandırılmıştır.

2.3 Sentezlenen Fe/ZIF-8 katalizörün karakterizasyonu

Sentezlenen malzemenin morfolojik özelliklerinin, yüzey alanı, gözenek yapısının incelenmesi için Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) haritalama, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve BET (Brunauer-Emmett-Teller) analizleri Çankırı Karatekin Üniversitesi Laboratuvarı'nda (ÇANKAM), X-ışını difraksiyonu (XRD) ve Termal gravimetrik analiz (TGA) ODTÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Yüzey alanı ve gözenek boyutu dağılımı, 77 K'da bir Quantachrome Nova Touch LX4 üzerinde toplanan azot adsorpsiyon verileri kullanılarak BET yöntemiyle karakterize edilmiştir. Adsorbanların XRD desenleri, $CuK\alpha$ radyasyonu kullanılarak Rigaku Ultima-IV cihazında, 2θ aralığında $2^\circ - 20^\circ$ arasında, saniyede $0,2^\circ$ hızla taranarak elde edilmiştir. TGA analizi, SDT Q600 cihazında, azot atmosferi altında, $30^\circ C$ 'den $600^\circ C$ 'ye kadar, $5^\circ C$ /dakika hızla ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey yapısı ve elementel bileşimler, $20 kV$ 'de çalışan bir Carl Zeiss Sigma 300 VP SEM cihazı ile analiz edilmiştir. Örneklerin FTIR spektrumları, $450 - 4000 cm^{-1}$ aralığında Bruker Tensor II analiz cihazı ile kaydedilmiştir.

2.4 Deney sistemi ve prosedür

Fenton benzeri oksidasyonu deneyleri beher ve sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fenton benzeri oksidasyonu deneylerinde çeşitli sıcaklıklarda $pH=3$ 'te KV boya giderimi gerçekleştirilmiştir. 5 ve 10 mg/L KV boya çözeltilerinin pH 'sı seyreltik sülfürik asit çözeltisi kullanılarak ayarlanmıştır. Sıcaklık istenen değere geldiğinde belirlenen miktarlarda Fe/ZIF-8 katalizör ve H_2O_2 tepkime ortamına eklenerek karıştırma uygulanmıştır. 60 dakikalık oksidasyon deneylerinde alınan sıvı örnekleri analiz edilerek KV giderimi belirlenmiştir.

2.5 Analiz

KV çözeltilerinin derişimlerdeki değişim UV-Görünür Bölge Spektrofotometresi kullanılarak analiz edilmiştir. Absorbans ölçümleri boyar maddenin UV-görünür bölge spektrumlarında en yüksek piklerin gözlemlendiği

dalgaboylarında (λ_{max}) yapılmıştır. KV renk giderimi 590 nm de [25] ölçülen absorbans değerleri ile Denklem 3'e göre belirlenmiştir:

$$\text{KV giderim yüzdesi: Renk Giderimi, \%} \\ = \left[\frac{A_o|_{@590 \text{ nm}} - A_t|_{@590 \text{ nm}}}{A_o|_{@590 \text{ nm}}} \right] \times 100 \quad (3)$$

A_o : Başlangıç anında ölçülen absorbans değeri, A_t : Reaksiyon süresince herhangi bir anda ölçülen absorbans değeri

2.6 Kinetik çalışma

Kinetik çalışma, farklı reaksiyon sıcaklıklarında (298, 303, 313, 323 K) incelenmiştir. Boya giderim verileri, etkili katalizör miktarı ve H_2O_2 belirlendikten sonra 10 mg/L KV, 100 mM H_2O_2 konsantrasyonunda, 0.5 g/L katalizör miktarı varlığında ve pH 3 te gerçekleştirilmiştir.

Literatürdeki Fenton ve Fenton benzeri oksidasyonu çalışmalarında pH değerinin genellikle 3'te optimize edildiği rapor edilmektedir [26]. Literatürde pH 3 değerlerinin üzerinde H_2O_2 'nin H_2O ve O_2 'ye bozunması gibi nedenlerle Fenton proseslerinde önemli ölçüde performans düşüşü olabileceği belirtilmektedir [27]. Ayrıca, hidroksil radikal oluşumu düşük pH değerlerinde H_2O_2 'nin H^+ iyonlarıyla reaksiyona girerek $H_3O_2^+$ (oksonyum iyonları) oluşturması nedeniyle azalmaktadır. Ek olarak, daha az asidik koşullarda, katalizörün ferrik hidroksit çöktürmeleri oluşturması yoluyla deaktivasyonu nedeniyle oksidasyon verimlilikleri azalmaktadır. Ayrıca daha düşük pH değerlerinde tepkime ortamındaki hidroksil radikallerini süpürücü etkiye sahip protonların artışı da boya gideriminde düşüşe neden olabilmektedir [28].

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Karakterizasyon sonuçları

Fe/ZIF-8 katalizörüne ait FTIR spektrumu Şekil 1'de gösterilmektedir. 800-1500 cm^{-1} arasındaki sarı bölge, ZIF ailesinin sentezinde kullanılan bağlayıcıya ait karakteristik bantı göstermektedir. 1635 cm^{-1} civarındaki sinyal C=C gerilme moduna, 1580 cm^{-1} 'deki bant ise C=N gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. 1440 cm^{-1} 'deki pik, imidazol grubundaki anti-simetrik CH_3 'ün bükülme moduyla ilişkilendirilebilir [29]. 1145 ve 995 cm^{-1} 'deki karakteristik tepe noktaları imidazol halkasındaki C=N ve C-N titreşimlerine atfedilebilir [30]. 1113 cm^{-1} 'deki pik imidazol bağlayıcı grubunda C-C ve C-H titreşimine karşılık gelmektedir. Yine imidazol halka gerilmesi bölgesinde yer alan 1045 cm^{-1} ve 929 cm^{-1} 'deki pikler C-H ve N-H gruplarının halka gerilmeleri ile ilişkilendirilmektedir [29]. 425 cm^{-1} 'de belirgin bant ise demir iyonlarının bağlayıcıda yer alan azot atomlarıyla birleşerek imidazolat yani ZIF yapısı oluşturduğunu göstermektedir [31, 32].

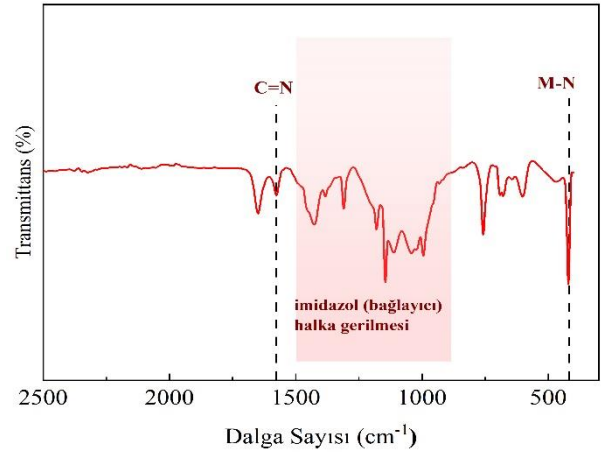
Bu bulgular, Fe/ZIF-8 sentezinin başarılı oluşumunu kanıtlamaktadır. FTIR verilerine ait pikler Tablo 1 de gösterilmektedir. Sentezlenen katalizörün XRD kırınım deseni Şekil 2'de gösterilmiştir.

Cambridge Kristalografi Veri Merkezi'nden (Cambridge Crystallographic Data Center) edinilen simüle edilen Fe/ZIF-8 (CCDC 899389) ve önceki çalışmalarla uyumluluk

gösteren bu katalizör 7.40°, 10.40°, 12.75°, 14.75°, 16.45° ve 18.00° noktalarında güçlü kırınım piklerine sahiptir [33]. Bu kırınım pikleri (110), (200), (211), (220), (310) ve (222) düzlemlerine karşılık gelmektedir.

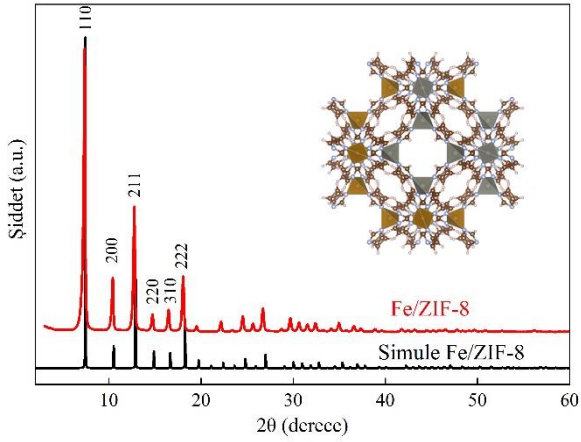
Tablo 1. FTIR analizine ait pikler ve ilişkili bağ türleri

Dalga sayısı	Bağ türü
1635 cm^{-1}	C=C gerilme modu
1580 cm^{-1}	C=N gerilme modu
1440	anti-simetrik CH_3 'ün bükülme modu
1145	C=N titreşimi
1113 cm^{-1}	C-C and C-H titreşimi
1045	C-H halka gerilmesi
995	C-N titreşimi
929	N-H halka gerilmesi
760	aromatik C-H germe bantı
425 cm^{-1}	Fe-N

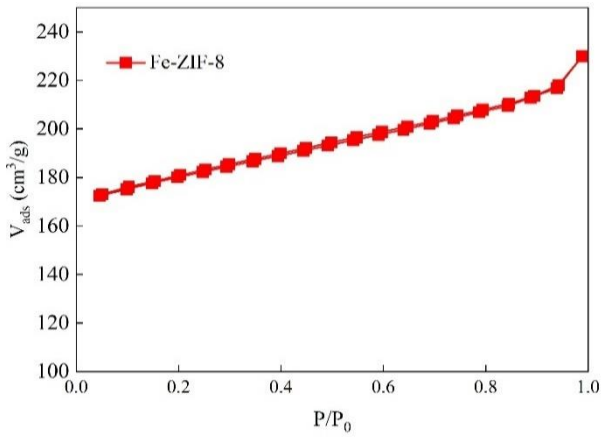


Şekil 1. Fe/ZIF-8 katalizörüne ait FTIR spektrumu

Azot (N_2) adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi, gözenekli malzemelerin yüzey alanı ve gözenek yapısı hakkında önemli bilgiler sunar. Fe/ZIF-8'in BET yüzey alanı ve gözenek yapısı, Şekil 3'te gösterildiği gibi azot adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi kullanılarak karakterize edilmiştir. 430 m^2/g özgül yüzey alanına sahip olduğu bulunmuştur. Histerezis döngüsünün olmaması, malzemenin mikrogözenekli yapısının baskın olduğunu ve adsorpsiyon ve desorpsiyonun tamamen geri dönüşümlü olduğunu gösterir. Bu durum, mikrogözeneklerin tamamen dolması ve sonrasında basınç değişimiyle azotun aynı şekilde salınması ile açıklanabilir. Toplam gözenek hacmi, doygunluğa yakın tek bir bağıl basınç noktasındaki ($p/p_0 \approx 0.99$) adsorpsiyon verileri kullanılarak 7.33 cm^3/g olarak belirlenmiştir.

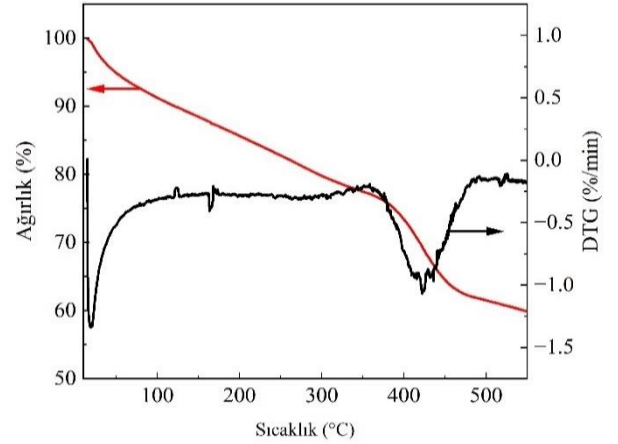


Şekil 2. Fe/ZIF-8 katalizörüne ve simüle edikmiş haline ait XRD deseni



Şekil 3. Fe/ZIF-8 katalizörüne ait N₂ adsorpsiyon/desorpsiyon eğrisi

Şekil 4 Fe/ZIF-8 katalizörünün sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği kütle kaybını detaylandırmaktadır. İlk olarak, 100-150 °C aralığında katalizörün içerdiği suyun buharlaşması sonucu yaklaşık %12 oranında bir kütle kaybı gözlemlenmiştir.

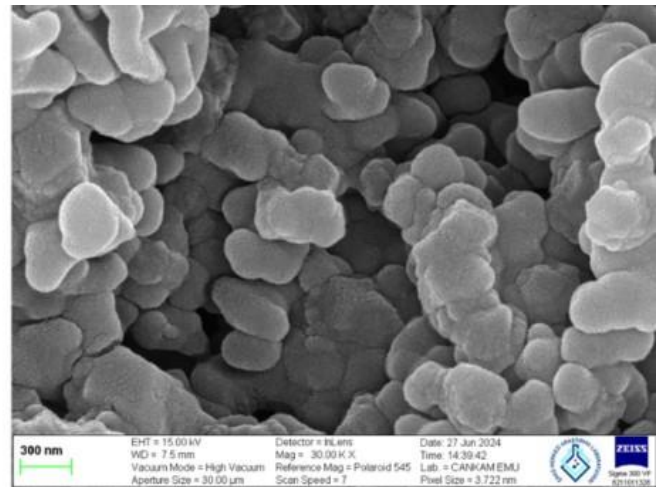
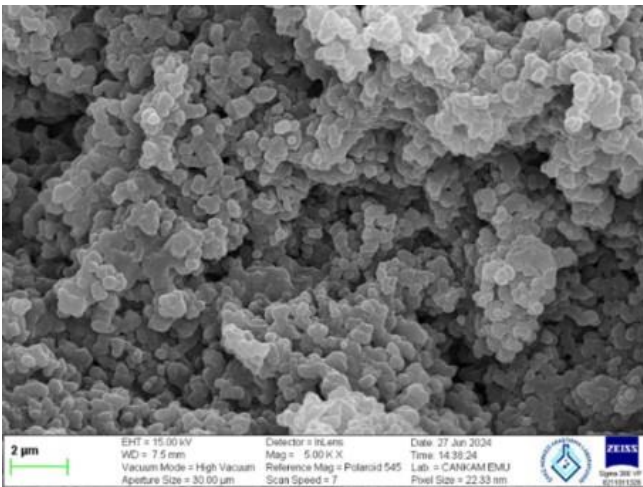


Şekil 4. Fe/ZIF-8 katalizörüne ait TGA ve DTG profilleri

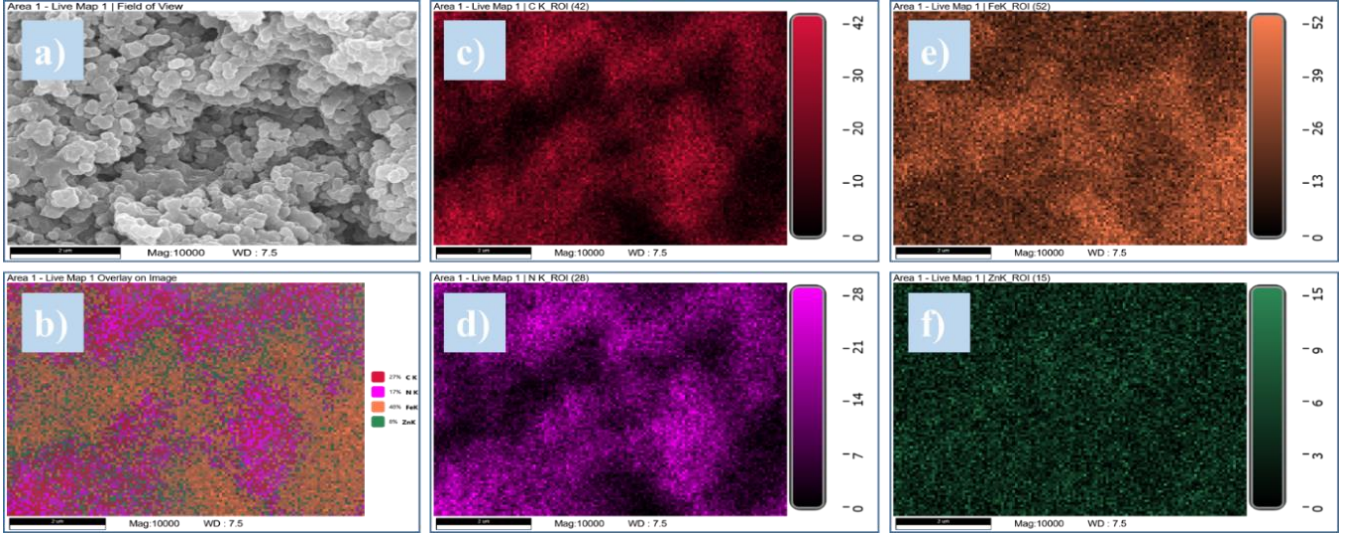
350 °C'yi aştıktan sonra ise, sentezlenen ZIF yapısının kararlılığını kaybettiği ve yapının tamamen bozulduğu gözlemlenmiştir. Bu bozulma, kütle kaybında ani ve belirgin bir düşüşle kendini göstermiştir ve yapının termal kararlılık sınırlarının ötesine geçildiğini işaret eder. SEM analizine göre (Şekil 5), Fe/ZIF-8 kristalleri, tipik ZIF-8 morfolojisi olan küçük ve monodispers, rombik dodekahedron yapı nanopartikülleridir. Ortalama parçacık boyutu 150 nm civarında olan bu malzemenin SEM-EDX haritalama analizi (Şekil 6) yapıda çinko ve demir elementlerinin bir arada bulunduğunu ortaya koymaktadır. SEM-EDX analizine göre yapıda bulunan elementler C, N, Fe ve Zn kütlece miktarları sırasıyla % 35.88, % 28.16, %22.19 ve % 13.77 olarak saptanmıştır.

3.1 Katalizör miktarının etkinliğinin incelenmesi

KV boyasının sudan uzaklaştırılması için Fe/ZIF-8 katalizörünün boya giderimi performansları hidrojen peroksit varlığında incelenmiştir. Reaksiyon koşulu 5 mg/L KV çözeltisi içerisine 100 mM H₂O₂ eklenerek pH 3 değerinde ve 30°C sıcaklık değerinde 3 farklı katalizör miktarının etkisi boya giderimine etkisi Şekil 7 de gösterilmektedir.



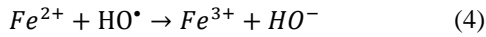
Şekil 5. Fe/ZIF-8 katalizörüne ait SEM analiz sonucu



Şekil 6. Fe/ZIF-8 katalizörüne a) genel tarama, b) tüm elementler, c) C, d) N, e) Fe ve f) Zn elementine ait SEM – EDX haritalama analiz sonucu haritalama analizi

Katalizör olmadan KV giderimi bir saat sonunda % 8.61 değerine ulaşırken, 0.5 g/L katalizör varlığında % 43.52 ye ulaşmıştır. 0.5 g/L değerine kadar katalizör yüklemesini ile KV gideriminde iyileşme görülmüştür. Belli bir noktaya kadar artan katalizör miktarının giderimin artmasına sebep olması katalizör miktarının artırılması, katalizör yüzeyindeki aktif bölgelerin sayısının artmasına neden olması ve böylece hidroksil radikallerinin oluşumunu hızlandırması ile açıklanabilir [34]. Katalizör miktarının daha fazla artması 30 dakika sonunda giderim değerini değiştirmekten 60 dakika sonunda bu değeri düşürmüştür.

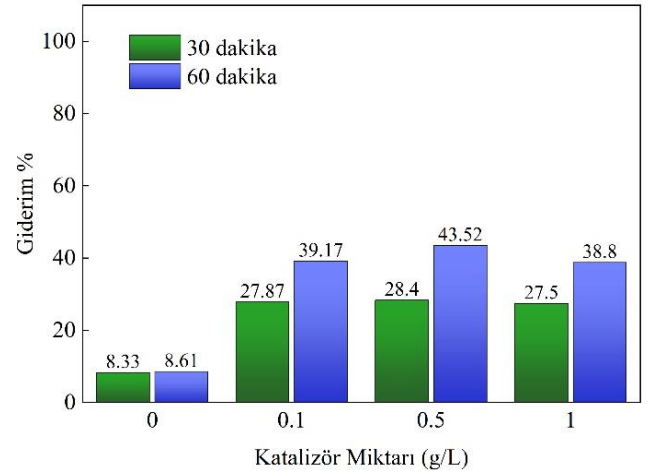
Katalizör yüklemesinin artırılması KV oksidasyonunu desteklese de, yüksek miktarda katalizör, aşırı miktardaki demir iyonlarının hidroksil radikalleriyle birleşerek ferrik (Fe^{3+}) ve hidroksit iyonları (HO^-) üretmesi nedeniyle (Denklem 4) oksidasyon oranlarını düşürebilmektedir [35]. Bu sebeple katalizör miktarı 0,5 g/L sabit tutularak daha sonraki çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



3.2 H_2O_2 miktarının etkisinin incelenmesi

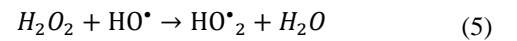
Fenton benzeri reaksiyonlar oksitleyici madde konsantrasyonu arttıkça hızla ilerlese de, aşırı H_2O_2 kullanımı, radikal oluşumunu artırarak istenmeyen yan reaksiyonlara ve yol açabilir. Bu yüzden, optimum H_2O_2 konsantrasyonunun belirlenmesi çevresel ve ekonomik açıdan önemlidir. KV gideriminde başlangıç H_2O_2 etkisi boya konsantrasyonu, katalizör yüklemesi, sıcaklık ve pH sırasıyla 10 mg/L, 0.5 g/L, 50°C ve 3'te sabit tutulurken 10, 25, 50, 100 ve 150 mM'lik bir H_2O_2 konsantrasyon aralığında test edilmiştir. Başlangıç H_2O_2 konsantrasyonuna göre değişen bozunma ve renk giderimi profilleri Şekil 8'de verilmiştir. H_2O_2 eklenmesi, H_2O_2 'nin $\bullet OH$ 'ye ayrışması yoluyla hidroksil radikallerinin oluşumuna ve dolayısıyla boyanın oksidasyonuna neden olmuştur. Düşük H_2O_2 konsantrasyonunda (10 mM), KV giderimi verimlilikleri sırasıyla %40.1 olarak değerlendirilirken, H_2O_2

konsantrasyonu 100 mM değerine ulaştığında giderme verimlilikleri %99.6'ya yükselmiştir.



Şekil 7. Katalizör miktarı etkisi

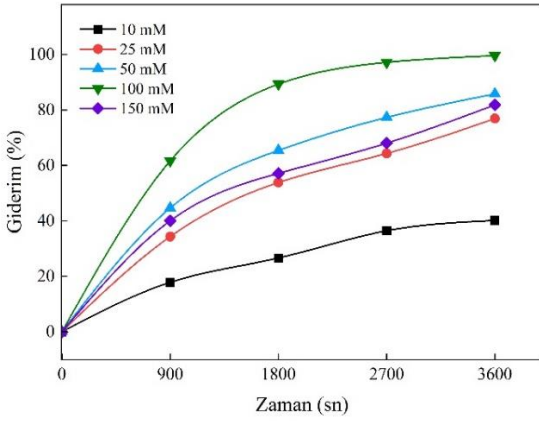
H_2O_2 konsantrasyonundaki daha fazla artış (150 mM değeri), KV giderim verimliliğini artırmadığı görülmüştür. Denklem 5'te gösterildiği gibi aşırı miktarda H_2O_2 kullanıldığında hidroksil radikallerinin uzaklaştırılması meydana gelebilir ve giderim yüzdesinde ki azalma buna bağlanabilir. Bu nedenle, bu çalışmada, 100 mM başlangıç H_2O_2 konsantrasyonu optimum koşul olarak seçilerek kinetik çalışma bu koşul altında yapılmıştır.



3.3 Sıcaklık etkisi ve kinetik çalışma

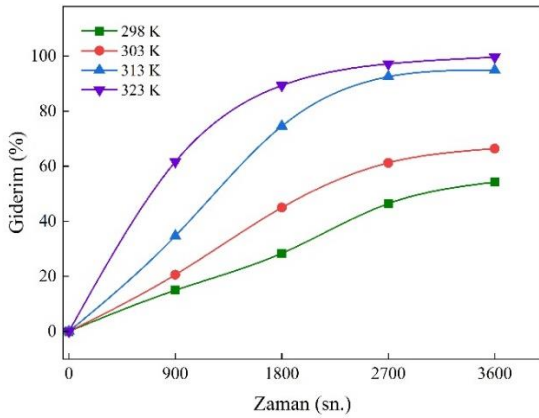
KV giderimi üzerindeki sıcaklığın etkisini açıklamak amacıyla, reaksiyon sıcaklığı 298, 303, 313, 323 K'e ayarlanmıştır. Sıcaklığın boya giderme verimliliğine etkisi Şekil 9'da gösterilmiştir. H_2O_2 ile $\bullet OH$ radikalleri gibi

oksitleyici türler üreten ferrik/feröz iyonlar arasındaki reaksiyonun hızının artması sebebiyle KV gideriminin sıcaklığın artırılmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Fenton benzeri oksidasyon sürecinde boyaın ayrışması karmaşıktır ve birçok katalitik adımı içerir; psödo-birinci dereceden renk giderim reaksiyonları için aşağıdaki basitleştirilmiş mekanizma önerilmiştir [36, 37]. Bu çalışmada KV giderim kinetiğini ifade etmek için psödo-birinci ve psödo-ikinci dereceden modelleri test edilmiştir. Bu modeller arasında, psödo-birinci dereceden reaksiyon modeli genellikle boyaın Fenton benzeri oksidasyonunu açıklayan en uygun model olarak belirlenir [36].



Şekil 8. Başlangıç H₂O₂ miktarı etkisi

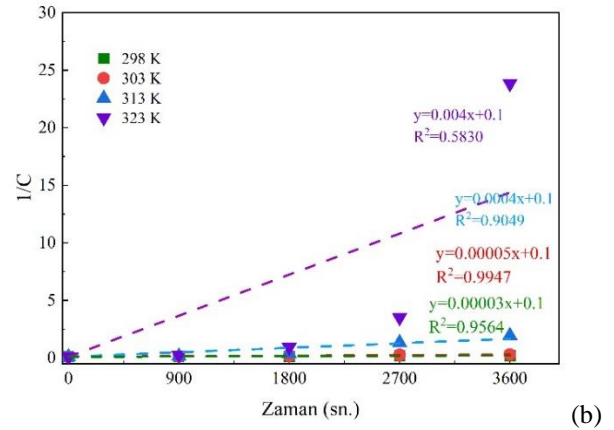
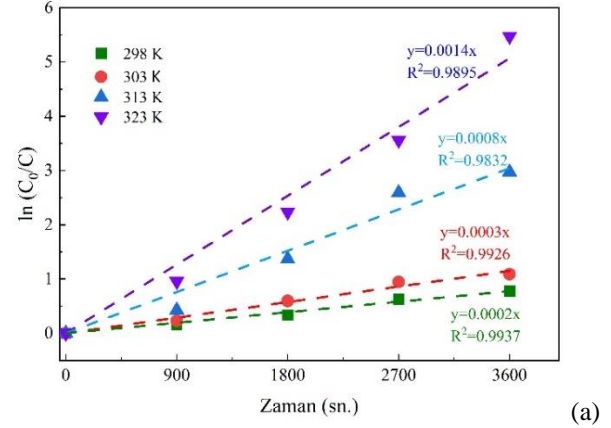
Şekil 10 (a) ve (b)' de kinetik modellerin doğrusallaştırılmış biçimlerine göre elde edilen grafikler gösterilmektedir ve KV giderim reaksiyonunun incelenen sıcaklıklarda yalancı birinci dereceden modele uygunluğu görülmektedir.



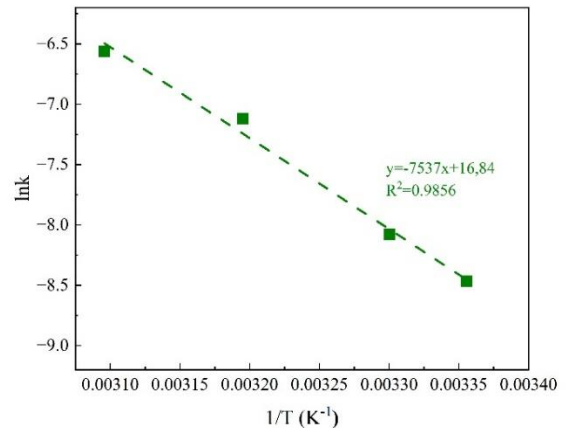
Şekil 9. Sıcaklık etkisi

298, 303, 313, 323 K'deki yalancı birinci dereceden reaksiyon hızı sabitleri sırasıyla 0.0002, 0.0003, 0.0008 ve 0.0014 sn⁻¹ olarak ve R² değerleri 0.98-0.99 aralığında hesaplanmıştır. Sıcaklık artışına bağlı olarak reaksiyon hızlarındaki artış, tepkime maddelerinin katalizör yüzeyine transferinin, reaksiyonun ve son ürünlerin katalizör yüzeyinden transferinin yüksek reaksiyon sıcaklıkları tarafından desteklendiğini göstermektedir [38].

Aktivasyon enerjisi yalancı birinci dereceden reaksiyon hızı sabitleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü, sıcaklığa göre değişen kinetik hız sabitleri kullanılarak Arrhenius denkleminin (Denklem 5) doğrusallaştırılmış biçimine göre Şekil 11 çizilerek hesaplanmıştır.



Şekil 10. KV giderimine ait kinetik model grafikleri (a) yalancı birinci derece ve (b) yalancı ikinci derece



Şekil 11. Fe/ZIF-8 katalizör varlığında KV giderimi için elde edilen Arrhenius grafiği

$$k = Ae\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (5)$$

A: Arrhenius sabiti (sn⁻¹), E: Aktivasyon enerjisi (J/mol), R: İdeal gaz sabiti, 8,314 J/molK, T: Sıcaklık (K)

Bu çalışma kapsamında aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü 62.70 kJ/mol ve $2.1 \times 10^7 \text{ sn}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada Demir yüklü ZIF-8 sentezi gerçekleştirilmiştir (Fe/ZIF-8). Sentezlenen Fe yüklü ZIF-8 Fenton benzeri oksidasyonu yöntemi ile atık sulardan KV uzaklaştırılmasında kullanılmıştır. Sentezlenen katalizör farklı karakterizasyon teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir.

10 mg/L KV konsantrasyonu, 0.5 g/L katalizör miktarı, pH=3, ve 100 mM H₂O₂ konsantrasyonunda ve 50 °C sıcaklık altında 1 saatin sonunda KV giderimi en yüksek değeri olan %99.6 ya ulaşmıştır. Yapılan kinetik çalışma sonucunda en uygun kinetik modelin birinci merteye olduğu görülmüştür. Aktivasyon enerjisi 65.70 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (Proje Numarası: 124M775) ve Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (MF081123B21) tarafından desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

Kaynaklar

- [1] P. Waranusantigul, P. Pokethitiyook, M. Kruatrachue, E.S. Upatham, Kinetics of basic dye (methylene blue) biosorption by giant duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). *Environmental Pollution*, 125, 385–392, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00107-6).
- [2] S. Gita, S.P. Shukla, N. Saharan, C. Prakash, G. Deshmukhe, Toxic Effects of Selected Textile Dyes on Elemental Composition, Photosynthetic Pigments, Protein Content and Growth of a Freshwater Chlorophycean Alga *Chlorella vulgaris*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 102, 795–801, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02599-w>.
- [3] M. Motola, E. Dworniczek, L. Satrapinsky, G. Chodaczek, J. Grzesiak, M. Gregor, T. Plecenik, J. Nowicka, G. Plesch, UV light-induced photocatalytic, antimicrobial, and antibiofilm performance of anodic TiO₂ nanotube layers prepared on titanium mesh and Ti sputtered on silicon. *Chemical Papers*, 73, 1163–1172, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0667-4>.
- [4] S. Natarajan, H.C. Bajaj, R.J. Tayade, Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process. *Journal of Environmental Sciences*, 65, 201–222, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.03.011>.
- [5] N. Sen, N.R. Shefa, K. Reza, S.M.A.Z. Shawon, M.W. Rahman, Adsorption of crystal violet dye from synthetic wastewater by ball-milled royal palm leaf sheath. *Scientific Reports*, 14, 1–17, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52395-8>.
- [6] E. Fosso-Kankeu, A. Webster, I.O. Ntwampe, F.B. Waanders, Coagulation/Flocculation Potential of Polyaluminium Chloride and Bentonite Clay Tested in the Removal of Methyl Red and Crystal Violet. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 1389–1397, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2244-x>.
- [7] Z. Zhang, F. Chen, R. Liu, C. Sun, H. Fan, Crystal violet degradation in the ozone/persulfate/ferroferrous oxide system: A heterogeneous catalytic process for simultaneous catalysis of ozone and persulfate. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139937, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.139937>.
- [8] R. Yu, J. Zhao, Z. Zhao, F. Cui, Copper substituted zinc ferrite with abundant oxygen vacancies for enhanced ciprofloxacin degradation via peroxymonosulfate activation. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 121998, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.121998>.
- [9] R.A.K. Hirani, A. Hannan, N. Rafique, L. Shi, W. Tian, H. Wang, H. Sun, Three-dimensional rGO/CNT/g-C₃N₄ macro discs as an efficient peroxymonosulfate activator for catalytic degradation of sulfamethoxazole. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132400, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2023.132400>.
- [10] A.D. Gupta, H. Singh, S. Varjani, M.K. Awasthi, B.S. Giri, A. Pandey, A critical review on biochar-based catalysts for the abatement of toxic pollutants from water via advanced oxidation processes (AOPs). *Science of the Total Environment*, 849, 157831, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157831>.
- [11] J.-H. Sun, S.-P. Sun, G.-L. Wang, L.-P. Qiao, Degradation of azo dye Amido black 10B in aqueous solution by Fenton oxidation process. *Dyes and Pigments*, 74, 647–652, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.04.006>.
- [12] V.F. Yusuf, N.I. Malek, S.K. Kailasa, Review on Metal-Organic Framework Classification, Synthetic Approaches, and Influencing Factors: Applications in Energy, Drug Delivery, and Wastewater Treatment. *ACS Omega*, 7, 44507–44531, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05310>.
- [13] A.K. Adhikari, K. Lin, Improving CO₂ adsorption capacities and CO₂/N₂ separation efficiencies of MOF-74 (Ni, Co) by doping palladium-containing activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1348–1360, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.086>.
- [14] C. Liu, Q. Liu, A. Huang, A superhydrophobic zeolitic imidazolate framework (ZIF-90) with high steam stability for efficient recovery of bioalcohols. *Chemical Communications*, 52, 3400–3402, 2016. <https://doi.org/10.1039/c5cc10171a>.
- [15] X. Duan, R. Lv, Z. Shi, C. Wang, H. Li, J. Ge, Z. Ji, Y. Yang, B. Li, G. Qian, A new metal-organic framework with suitable pore size and ttd-type topology revealing highly selective adsorption and separation of organic dyes. *Journal of Solid State Chemistry*, 277, 159–162, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.JSSC.2019.06.012>.
- [16] Y. Zhou and M. Zhang, Response to Comment on

- 'removal of Crystal Violet by a Novel Cellulose-Based Adsorbent: Comparison with Native Cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55, 1148, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04874>.
- [17] M. Rahmat, A. Rehman, S. Rahmat, H.N. Bhatti, M. Iqbal, W.S. Khan, S.Z. Bajwa, R. Rahmat, A. Nazir, Highly efficient removal of crystal violet dye from water by MnO₂ based nanofibrous mesh/photocatalytic process. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 5149–5159, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2019.08.038>.
- [18] C.C. Chen, W.C. Chen, M.R. Chiou, S.W. Chen, Y.Y. Chen, H.J. Fan, Degradation of crystal violet by an FeGAC/H₂O₂ process. *Journal of Hazardous Materials*, 196, 420–425, 2011. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2011.09.042>.
- [19] Y.R. Huang, Y. Kong, H.Z. Li, X.M. Wei, Removal of crystal violet by ultraviolet/persulfate: Effects, kinetics and degradation pathways. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100780, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.100780>.
- [20] M. Wu, S. Li, S. Zhou, F. Li, T. Li, H. Li, Fe/sponge structure peanut shell carbon composite preparation for efficient Fenton oxidation crystal violet. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 105457–105473, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29828-4>.
- [21] O.P. Kumar, M.A. Nazir, S.S.A. Shah, A. Hashem, A. Kumar, E.F. Abd Allah, A. ur Rehman, Ternary metal conjugated ZIF-67 coordination with Ag and Ce for the efficient Fenton-like remediation of dyes under visible light. *Optical Materials*, 150, 115228, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115228>.
- [22] O. Assila, N. Vilaça, A.R. Bertão, A.M. Fonseca, P. Parpot, O.S.G.P. Soares, M.F.R. Pereira, F. Baltazar, M. Bañobre-López, I.C. Neves, Optimization of iron-ZIF-8 catalysts for degradation of tartrazine in water by Fenton-like reaction. *Chemosphere*. 339 139634, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139634>
- [23] T.H. V. Luong, T.H.T. Nguyen, B. V. Nguyen, N.K. Nguyen, T.Q.C. Nguyen, G.H. Dang, Efficient degradation of methyl orange and methylene blue in aqueous solution using a novel Fenton-like catalyst of CuCo-ZIFs. *Green Process Synthesis*, 11, 71–83, 2022. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0006>.
- [24] J. Li, T. Tian, Y. Jia, N. Xu, S. Yang, C. Zhang, S. Gao, W. Shen, Z. Wang, Adsorption performance and optimization by response surface methodology on tetracycline using Fe-doped ZIF-8-loaded multi-walled carbon nanotubes. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 4123–4136, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22524-9>.
- [25] A. Ravi, P. Annamalai, V. Sankar, K.R. Achutharaman, H. Valdes, A. SaravanaVadivu, V. Muthaiah Pillai, S.A. Alharbi, Sustainable synthesis, superior performance: Nanoflower-like α -Bi₂O₃ from solvent-free solid state for photocatalytic crystal violet degradation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 157, 105413, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105413>.
- [26] M. Siddique, R. Farooq, G.J. Price, Synergistic effects of combining ultrasound with the Fenton process in the degradation of Reactive Blue 19. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1206–1212, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2013.12.016>
- [27] J.H. Sun, S.P. Sun, G.L. Wang, L.P. Qiao, Degradation of azo dye Amido black 10B in aqueous solution by Fenton oxidation process. *Dyes and Pigments*, 74, 647–652, 2007. <https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2006.04.006>.
- [28] S.A. Walling, W. Um, C.L. Corkhill, N.C. Hyatt, Fenton and Fenton-like wet oxidation for degradation and destruction of organic radioactive wastes. *Npj Materials Degradation*, 5, 1–20, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00192-3>.
- [29] A.H.A. Rahim, S.R. Majid, Ni/Co-based zeolitic-imidazolate framework pseudocapacitance in asymmetrical cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, 53, 1727–1737, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10800-023-01888-x>.
- [30] C. Wu, Q. Liu, R. Chen, J. Liu, H. Zhang, R. Li, K. Takahashi, P. Liu, J. Wang, Fabrication of ZIF-8@SiO₂ Micro/Nano Hierarchical Superhydrophobic Surface on AZ31 Magnesium Alloy with Impressive Corrosion Resistance and Abrasion Resistance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9, 11106–11115, 2017. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b16848>.
- [31] Z. Huang, J. Zhou, Y. Zhao, H. Cheng, G. Lu, A.W. Morawski, Y. Yu, Stable core-shell ZIF-8@ZIF-67 MOFs photocatalyst for highly efficient degradation of organic pollutant and hydrogen evolution. *Journal of Materials Research*, 36, 602–614, 2021. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00117-5>.
- [32] Y. Zhang, S.J. Park, Facile construction of MoO₃@ZIF-8 core-shell nanorods for efficient photoreduction of aqueous Cr (VI). *Applied Catalysis B: Environmental*, 240, 92–101, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2018.08.077>.
- [33] N.A.H. Md Nordin, S.M. Racha, T. Matsuura, N. Misdan, N.A. Abdullah Sani, A.F. Ismail, A. Mustafa, Facile modification of ZIF-8 mixed matrix membrane for CO₂/CH₄ separation: Synthesis and preparation. *RSC Advances*, 5, 43110–43120, 2015. <https://doi.org/10.1039/c5ra02230d>.
- [34] H. Ghasemi, S. Mozaffari, S.H. Mousavi, B. Aghabarari, N. Abu-Zahra, Decolorization of wastewater by heterogeneous Fenton reaction using MnO₂-Fe₃O₄/CuO hybrid catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 105091, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105091>.
- [35] H. Ghasemi, B. Aghabarari, M. Alizadeh, A. Khanlarkhani, N. Abu-Zahra, High efficiency decolorization of wastewater by Fenton catalyst: Magnetic iron-copper hybrid oxides. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101540, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101540>.
- [36] M. Nie, Y. Li, J. He, C. Xie, Z. Wu, B. Sun, K. Zhang, L. Kong, J. Liu, Degradation of tetracycline in water using Fe₃O₄ nanospheres as Fenton-like catalysts:

- Kinetics, mechanisms and pathways. *New Journal of Chemistry*, 44, 2847–2857, 2020. <https://doi.org/10.1039/d0nj00125b>.
- [37] B. Guo, T. Xu, L. Zhang, S. Li, A heterogeneous fenton-like system with green iron nanoparticles for the removal of bisphenol A : Performance, kinetics and transformation mechanism. *Journal of Environmental Management*, 272 111047, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111047>.
- [38] N. Nuñez, E. Lima, M. Vásquez Mansilla, G.F. Goya, Á. Gallo-Cordova, M. del P. Morales, E.L. Winkler, Effect of temperature and copper doping on the heterogeneous fenton-like activity of $Cu_xFe_{3-x}O_4$ nanoparticles. *Applied Surface Science*, 656, 159655, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2024.159655>





Melanomannın yüzeyde zenginleştirilmiş Raman spektroskopisi ile tespitinde ortama eklenen serumun sınıflandırma başarısı üzerine etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of serum added to the medium on the classification success in the detection of melanoma using surface-enhanced Raman spectroscopy

Fatma Uysal Çiloğlu^{*1} 

¹Erciyes Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri Türkiye

Öz

Dünya genelinde ölüm oranları açısından ilk sıralarda yer alan melanomannın tespitinde kullanılan yöntemlerin dezavantajlarından dolayı yeni yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda yüzeyde zenginleştirilmiş Raman spektroskopisi (YZRS) güçlü ve alternatif bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada deri fibroblast, tümör ilişkili fibroblast ve melanoma hücrelerinin kültür aşamasında hücre kültür ortamına eklenen serumun hücrelerden toplanan YZRS spektrumlarının sınıflandırma başarısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Serum eklenen ve eklenmeyen ortamda kültürlenilen hücrelerden elde edilen YZRS spektrumlarının; temel bileşen analizi (TBA), yeniden yapılanma bağımsız bileşen analizi (YYBBA) ve seyrek filtreleme (SF) yöntemleri kullanılarak öz nitelik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Çıkarılan öz nitelikleri sınıflandırmak için destek vektör makinası (DVM) ve k en yakın komşu (KEYK) algoritması kullanılmıştır. Serum eklenmeyen hücre kültür ortamlarında kültürlenilen hücrelerden toplanan spektrumların makine öğrenme teknikleri ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirildiğinde sınıflandırma başarılarının serum eklenen gruba göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Serum eklenmeyen hücre grubunun sınıflandırma başarısı SF ile DVM kullanıldığında %96.4±0.4, TBA ile KEYK algoritması kullanıldığında %96.8±0.29 olarak bulunmuş olup serum eklenen ve eklenmeyen gruplara ait sınıflandırma başarısı arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Melanoma, Yüzeyde zenginleştirilmiş Raman spektroskopisi, Temel bileşen analizi, Yeniden yapılanma bağımsız bileşen analizi, Seyrek filtreleme

1 Giriş

Hücrelerin kontrolsüz bir şekilde büyüyüp çoğalması sonucu meydana gelen kanser, dünya genelinde önemli bir sağlık sorunu olup ölüm nedenleri arasında başı çekmektedir [1,2]. Cilt kanseri veya melanoma, ciltteki pigment üreten hücreler olan melanositlerden kaynaklanan kötü huylu bir tümördür [3]. ABD ulusal kanser enstitüsü verilerine göre

Abstract

Due to the disadvantages of the methods used for the detection of melanoma, which ranks among the leading causes of death worldwide, there is a need for the development of new methods. In this context, surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) emerges as a powerful and alternative technique. In this study, the effect of serum added to the cell culture medium during the culture of skin fibroblasts, tumor-associated fibroblasts, and melanoma cells on the classification success of SERS spectra collected from the cells was investigated. Feature extraction was performed using principal component analysis (PCA), reconstruction-independent component analysis (RICA), and sparse filtering (SF) methods on SERS spectra obtained from cells cultured in media with and without serum. Support vector machines (SVM) and k-nearest neighbors (KNN) algorithms were used to classify the extracted features. It was found that the classification accuracy of spectra collected from cells cultured in serum-free media was higher compared to those from the serum-added group when classified using machine learning techniques. The classification accuracy of the serum-free cell group was found to be 96.4±0.4% using SF with SVM and 96.8±0.29% using PCA with the KNN algorithm, with a statistically significant difference in classification accuracy between the serum-added and serum-free groups.

Keywords: Melanoma, Surface enhanced Raman spectroscopy, Principal component analysis, Reconstruction independent component analysis, sparse filtering

ABD'de yaygın kanser türleri içerisinde görülme sıklığı açısından 5. sırada yer alan melanomaya ait 2024 yılında 100.640 yeni vaka kaydedileceği aynı yıl içinde melanoma kaynaklı 8.290 ölüm meydana geleceği tahmin edilmektedir [4]. Diğer kanser türlerinde olduğu gibi melanomada da erken teşhis son derece önemlidir. Melanoma tanısı tipik olarak klinik değerlendirme, görüntüleme testleri ve biyopsi prosedürlerinin bir kombinasyonunu içermektedir [5].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fatmauysal@erciyes.edu.tr (F. Uysal Çiloğlu)
Geliş / Received: 01.06.2024 Kabul / Accepted: 15.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1493656

Bununla birlikte bu yöntemlerin kullanımı zaman alıcı olabilmekte ve girişimsel aşamalar gerektirebilmektedir. Bu nedenle hızlı ve yüksek doğrulukla sonuç verebilen ve mevcut yöntemlerin dezavantajlarını ortadan kaldıracak nitelikte yeni yöntemlere ihtiyaç vardır.

Yüzeyle Zenginleştirilmiş Raman Spektroskopisi (YZRS) son yıllarda oldukça artan popülerliğe sahip bir yöntem olup kanserin, patojenlerin ve hastalıkların hızlı tespitine yönelik yaygın şekilde kullanılmaktadır [6-9]. YZRS, Raman spektroskopinin sağladığı moleküler parmak izi özgülüğünü potansiyel tek molekül hassasiyetiyle birleştirir [10]. Bu teknik; örnek hazırlama sürecinin kolay olması, numuneye zarar vermemesi, yüksek maliyetli olmaması, kullanımı için eğitilmiş personel gerektirmemesi gibi avantajlara sahiptir [11]. Bununla birlikte benzer bileşimli numunelere ait spektrumların oldukça benzer olması elde edilen verilerin analizi için gelişmiş veri işleme algoritmalarının kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Bu kapsamda gözetimli ve gözetimsiz makine öğrenme algoritmalarından sıklıkla faydalanılmaktadır [12]. Bu algoritmalar sayesinde son derece benzer spektral özelliklere sahip kanserli ve sağlıklı hücrelerin ayrıştırılması başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [13].

Oldukça agresif ve metastatik özellik gösteren melanomanın YZRS ile tespitine yönelik çalışmalar literatürde rapor edilmiştir. Qiu vd. [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada melanosit ve melanoma hücrelerini ayırt etmek için hücrelere ait YZRS spektrumları katı yüzey altın nanoparçacıklar üzerinden toplanmıştır. Son derece benzer olan spektrumları sınıflandırmak için evrişimli sinir ağları kullanıldığında %98'lik bir sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Wang vd. [15] tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise 20 melanoma hastası ve 21 sağlıklı kişiden alınan kan serumu örneklerinden elde edilen hücre dışı veziküllerdeki protein biyobelirteçler mikroakışkan cihaz üzerinde yakalanarak YZRS spektrumları toplanmıştır. Melanom hastaları ve sağlıklı kişilere ait protein biyobelirteçleri YZRS sinyalleri arasında anlamlı farklar bulunmuştur. Yousuff vd. [16] tarafından yapılan çalışmada sağlıklı ve melanoma grubu ayrıştırmak için YZRS ve makine öğrenme teknikleri birlikte kullanıldığında yüksek bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Erzina vd.'nin [17] yaptığı geniş kapsamlı çalışmada melanoma hücreleri, normal deri fibroblast hücreleri ve tümör ilişkili fibroblastlara ait YZRS spektrumları toplanarak bu hücre grupları evrişimli sinir ağları ile başarılı bir şekilde sınıflandırılmıştır.

Şu ana kadar melanomanın YZRS ile tespitine yönelik gerçekleştirilen çalışmalarda ağırlıklı olarak hücre kültür ortamında büyütülen hücrelerin spektrumları toplanarak sağlıklı ve kanserli hücrelerin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir [14,17]. Kullanılacak hücre tipine bağlı olarak kültür ortamı parametreleri değişiklik gösterebilmektedir [18]. Hücre kültür ortamında bulunan aminoasit, karbonhidrat, vitamin ve çeşitli iyonlar hücrede metabolik olayların gerçekleşmesi için gerekli ortamı sağlar [19]. Ayrıca serum içeren çözeltiler içerisinde bulunan hormonlar, proteinler, büyüme faktörleri gibi bileşenler hücre çoğalması için gereken bileşenlerdir [18]. Bununla

birlikte hücre kültür ortamında serum kullanımı bazı dezavantajları da beraberinde getirebilmektedir. Bu dezavantajların başında bileşiminin değişken olması ve virüs, mikoplazma, prion gibi kirletici kaynakları içermesi sayılabilir [20,21]. Pek çok hücre hattı serum içermeyen özel kültür ortamında büyütülebilmektedir [21]. Literatürde hücre kültür ortamı parametrelerinde yapılan değişikliklerin hücrelerden toplanan YZRS spektrumlarında bir değişiklik oluşturup oluşturmadığına yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada hücre kültür ortamına eklenen serumun melanomanın tespitinde hücrelerden toplanan spektrumların sınıflandırma başarısı üzerine etkisi incelenmiştir. Serum eklenen ve eklenmeyen normal deri fibroblast hücreleri, tümör ilişkili fibroblast hücreleri ve melanoma hücrelerine ait YZRS spektrumlarının çeşitli makine öğrenme algoritmaları ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilerek ortama eklenen serumun sınıflandırma başarısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında Erzina vd. [17] tarafından yapılan çalışmada toplanan veri seti kullanılmıştır. Serum eklenen ve eklenmeyen ortamda kültürlenen hücrelere ait YZRS spektrumlarından temel bileşen analizi (TBA), yeniden yapılanma bağımsız bileşen analizi (YYBBA) ve seyrek filtreleme (SF) yöntemleri kullanılarak öz nitelik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Çıkarılan öz nitelikler destek vektör makinesi (DVM) ve k en yakın komşu (KEYK) algoritması ile sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar hücre kültür ortamına serum eklenen ve eklenmeyen gruptan elde edilen sınıflandırma başarıları arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir. Bu çalışmadan elde edilen veriler, kanserli ve sağlıklı hücrelerin YZRS ile tespitinde hücrelerin hücre kültür ortamında büyütülmesi sırasında ortama eklenecek serum konusunda yol gösterici olacaktır.

2 Metot

2.1 Veri seti

Bu çalışmada erişime açık olarak sunulan bir veri seti kullanılmıştır. Sunulan veriler Erzina vd. tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir ve verilerle ilgili ayrıntılı bilgilere ilgili referanstan ulaşılabilir [17]. Veri seti, deri fibroblast, tümör ilişkili fibroblast ve melanoma hücrelerine ait YZRS spektrumlarının ADT-NH₂, 4-ADT-COOH veya ADT-(COOH)₂ ile işlevselleştirilmiş Au nanoparçacık yüzey üzerinden toplanmasıyla elde edilmiştir. Hücre hattı veya birincil kültürden elde edilen hücrelerin kültür ortamında büyütülmesi sırasında örneklerin bir grubuna %10 fetal sığır serumu eklenirken diğer gruba serum eklenmemiş ve her iki gruptan YZRS spektrumları toplanmıştır. Spektrumlar 785 nm dalga boylu lazer ile 33 mW lazer gücü altında toplanmıştır. Orijinal veri setinde spektrumlara ait taban hattı çıkarıldıktan sonra normalize edilmiştir. Verilerin parmak izi bölgesi olarak nitelendirilen bölgede yer alan 400-2500 cm⁻¹ bölgesi arasında kalan kısımları kullanılmıştır.

2.2 Veri analizi

Veri seti, hücre kültür ortamına %10 fetal sığır serumu eklenen ve serum eklenmeyen ortamda büyüyen hücrelerden elde edilen spektrumlardan oluşmaktadır. Serum eklenen

ortamdan toplanan spektrumların 157 tanesi deri fibroblast hücrelerinden, 150 tanesi tümör ilişkili fibroblast hücrelerinden ve 322 tanesi melanoma hücrelerinden oluşmaktadır. Serum eklenmeyen ortamdan toplanan spektrumların 151 tanesi deri fibroblast hücrelerinden, 151 tanesi tümör ilişkili fibroblast hücrelerinden ve 308 tanesi melanoma hücrelerinden elde edilmiştir. Veri setinde toplam 1239 spektrum yer almaktadır.

Hücre kültür ortamına eklenen serumun sınıflandırma başarısı üzerine etkisini araştırmak için farklı öz nitelik çıkarım metodları ve sınıflandırıcılar kullanılmıştır. Sınıflandırıcı başarısı öz nitelik çıkarım metoduna büyük oranda bağlı olduğu için bu çalışmada farklı öz nitelik çıkarım metodlarından faydalanılmıştır. Burada kullanılan TBA ve YYBBA girdi verilerini çıktı özelliklerine dönüştürürken doğrusal bir dönüşüm kullanırken SF bu amaç için doğrusal olmayan bir dönüşüm kullanır. Böylece öz nitelik çıkarımında hem linear hem de linear olmayan öz nitelik çıkarım yöntemleri kullanılarak serum eklenen ve eklenmeyen grupların sınıflandırma başarıları kapsamlı şekilde kıyaslanmıştır.

2.2.1 Öz nitelik çıkarma

Veri setinden öz niteliklerin çıkarılması amacı ile TBA, YYBBA ve SF olmak üzere 3 farklı öz nitelik çıkarma yöntemi kullanılmıştır. TBA, Raman spektrumlarından anlamlı bilgi çıkarmak için sıklıkla başvurulan gözetimsiz bir makine öğrenme yöntemidir [22,23]. TBA ile çok boyutlu uzayda yer alan veri içerisindeki varyans mümkün olduğunca korunarak verinin daha küçük boyutlu uzaylara indirgenmesi gerçekleştirilir. Dönüşüm sonrası ilk temel bileşen en büyük varyansa sahiptir ve son temel bileşene doğru gidildikçe varyans azalır [24]. TBA ile veri içerisindeki doğrusal ilişkiler belirlenerek veriden doğrusal öz nitelikler çıkarılması sağlanır. YYBBA, bağımsız bileşen analizinden yola çıkılarak elde edilen gözetimsiz bir öz nitelik çıkarma yöntemidir ve bağımsız bileşen analizinde ortaya çıkan dezavantajların üstesinden gelebilmektedir. Bağımsız bileşen analizinin kısa tanımlaması için m adet örnekten oluşan bir veri seti $\{x^{(i)}\}_{i=1}^m$, $x^{(i)} \in \mathbb{R}^n$ şeklinde verilmiş olsun. Burada her bir örneği k adet bağımsız bileşen ile temsil etmek için Denklem (1)'de verilen ifadeyi minimum yapan ağırlık matrisi W 'nin bulunması gerekmektedir [25].

$$\min W, \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k g(W_j x^{(i)}), \quad WW^T = I \quad (1)$$

Burada verilen g lineer olmayan yapıda konveks bir fonksiyondur ve genellikle $g(\cdot) := \log(\cosh(\cdot))$ ile tanımlanır. $W \in \mathbb{R}^{k \times n}$ olarak tanımlanan W ağırlık matrisidir ve k öz nitelik sayısını ifade etmektedir. Denklem (1)'de verilen W_j , W matrisindeki bir satırı göstermektedir. Burada verilen $WW^T=I$ ifadesi ortonormallik kısıtı olarak tanımlanmaktadır [25].

Bağımsız bileşen analizinin bazı ortonormallik sorunları vardır. Bunun üstesinden gelmek için YYBBA'dan faydalanılır. YYBBA'nde ortonormallik kısıtı ortadan

kaldırılarak *yeniden yapılandırma maliyeti* adı verilen yumuşak bir ceza terimi uygulanmaktadır [26]. Buna ait eşitlik Denklem (2)'de verilmiştir. Denklem (2)'de verilen $\lambda > 0$ parametresi yeniden yapılandırma hatası ile seyreklik arasındaki dengeyi ifade etmektedir.

$$\min W, \quad \frac{\lambda}{m} \sum_{i=1}^m \|W^T W x^{(i)} - x^{(i)}\|_2^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k g(W_j x^{(i)}) \quad (2)$$

SF öz nitelik çıkarım yöntemi, az sayıda hiper parametreye sahip olması ve kullanımının kolay olması gibi özelliklerinden dolayı tercih edilen etkili bir yöntemdir. Seyrek filtreleme ilk olarak Ngiam vd. tarafından önerilmiştir [27]. Yöntem kısaca öz nitelik matrisine seyreklik optimizasyonu uygulayarak girdi örneklerinden seyrek öz nitelikleri öğrenmeyi amaçlamaktadır. Etiketli olarak verilen $\{x_i\}_{i=1}^N$ bir veri seti N örnek içeriyor ve $x_i \in \mathbb{R}^D$ olsun. SF yöntemi, Denklem (3) x_i 'leri $f_i \in \mathbb{R}^d$ 'ye eşleyerek yeni öz nitelikler elde edilmesini sağlar. Burada $h(\cdot)$ lineer olmayan yapıda bir aktivasyon fonksiyonudur, d ise veriden çıkarılacak öz nitelik sayısını ifade eder. Buradaki $W \in \mathbb{R}^{d \times D}$ ise giriş ve çıkışı bağlayan ağırlık matrisidir [28].

$$f_i = h(W^T x_i) \quad (3)$$

SF yönteminin asıl görevi, her bir girdi örneği x_i 'nin karşılık gelen f_i ile iyi bir şekilde temsil edilebileceği optimal bir W 'yi öğrenmektir. Bu yöntemle ait amaç fonksiyonu Denklem (4)'te verildiği gibi formüle edilir. Denklem (4)'te verilen optimizasyon süreci aynı zamanda W matrisinin en uygun ağırlıklarının belirlenmesinin optimizasyon sürecini ifade etmektedir. Burada en uygun W matrisi belirlendikten sonra girdi verilerine ait öz nitelikler Denklem (3) vasıtasıyla çıkarılır [28].

$$\min_W J(W) = \sum_{i=1}^N \|\hat{f}_i\|_1 \quad (4)$$

Verilen öz nitelik çıkarma yöntemleri için 50 öz nitelik çıkarıldığında yüksek sınıflandırma doğruluğuna ulaşılmıştır. Öz nitelik sayısı 50'den fazla seçilse bile sınıflandırma doğruluğunda önemli bir değişim meydana gelmediği için her 3 öz nitelik çıkarma yönteminde de 50 öz nitelik çıkarılarak sınıflandırıcı girişlerine uygulanmıştır.

2.2.2 Sınıflandırma

Serum içeren ve içermeyen ortamlarda büyütülen deri fibroblast hücreleri, tümör ilişkili fibroblast hücreleri ve melanoma hücrelerine ait YZRS spektrumlarından farklı öz nitelik çıkarma yöntemleri kullanılarak elde edilen öz nitelikler sınıflandırılmıştır. Bu amaçla geleneksel sınıflandırma yöntemleri olan ve YZRS spektrumlarının sınıflandırılmasında oldukça başarılı sonuçlar veren DVM ve KEYK algoritmaları kullanılmıştır.

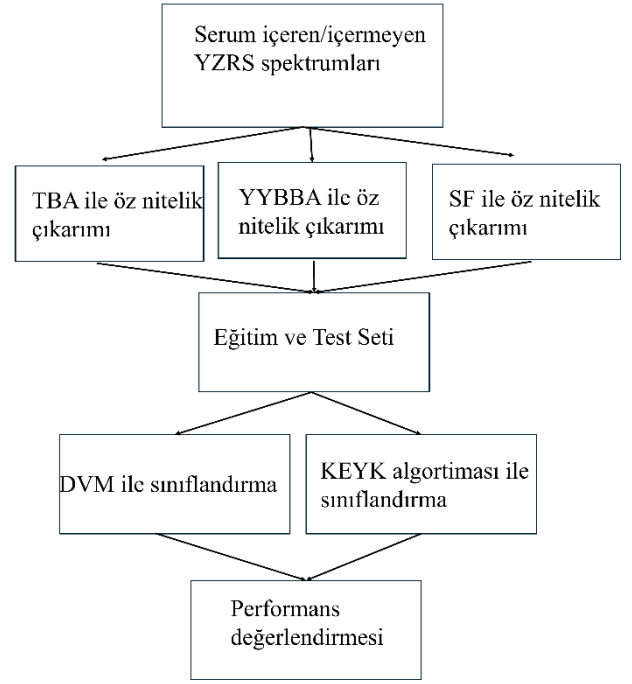
Serum eklenen ve eklenmeyen ortamlarda büyütülen hücrelere ait YZRS spektrumları öz nitelik çıkarma işleminden sonra 2 ayrı veri seti şeklinde sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırıcılara ait model parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Sınıflandırıcıların model parametreleri belirlenirken optimum parametreleri belirlemek için 10 kat çapraz doğrulama algoritmasından faydalanılmıştır. 10 kat çapraz doğrulama tekniğinde veri seti 10 eşit parçaya bölünüp her seferinde bir kısmı test verisi, kalanı eğitim verisi olarak kullanılır. Bu süreç 10 kez tekrarlanır ve modelin genel doğruluğu hesaplanır. KEYK algoritmasında da optimum k değeri, farklı k değerleri denenerek çapraz doğrulama sırasında en iyi performansı veren k değeri seçilerek belirlenmiştir. Sınıflandırıcı performanslarını değerlendirmek için karmaşıklık matrisleri üzerinden sınıflandırıcılara ait doğruluk değerleri hesaplanmıştır. Sınıflandırıcılar 50 kez çalıştırılmış ve sınıflandırıcı doğruluklarına ait ortalama \pm standart sapma değerleri bulunmuştur. Doğruluk değeri hesaplanırken karmaşıklık matrisi üzerindeki köşegen elemanları toplanarak matristeki elemanların toplamına bölünmüştür. Tüm veri analiz aşamaları MATLAB (The MathWorks, Natick, USA) ile gerçekleştirilmiştir. Veri analizi için gerçekleştirilen aşamalar Şekil 1’deki blok diyagramda verilmiştir.

Tablo 1. Sınıflandırıcı modellerini oluşturmak için kullanılan parametreler

Sınıflandırıcı	Parametre	Değeri
DVM	Çekirdek fonksiyon	Polinom
	Çekirdek derecesi	2
	Box constraint	1
	Çekirdek ölçeği	1
	Çözücü	Sıralı minimal optimizasyon
KEYK	Komşu sayısı	1
	Uzaklık ölçümü	Öklid mesafesi
	Mesafe ağırlıklandırma fonksiyonu	Equal

2.2.3 İstatistiksel analiz

Melanoma tespitinde hücre kültür ortamına serum eklenen ve eklenmeyen hücrelerden toplanan YZRS spektrumlarının sınıflandırma başarısı üzerine etkisini araştırmak için Mann-Whitney U test kullanılmıştır. Bu test iki grup arasında fark olup olmadığını test etmek için kullanılan parametrik olmayan bir testtir [29]. Elde edilen veriler, normal dağılıma uymadığından bu testin kullanımı uygun bulunmuştur. Serum içeren ve içermeyen verilerin farklı öz nitelik çıkarım yöntemleri ile elde edilen sınıflandırıcı doğrulukları arasında fark olup olmadığını araştırmak için Mann-Whitney U test %95 güven düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Böylece $p < 0.05$ için gruplar arasında istatistiksel açıdan anlamlı fark olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 1. Serum içeren ve içermeyen ortamda büyütülen hücrelerden elde edilen YZRS spektrumlarının veri analizine ait blok diyagram

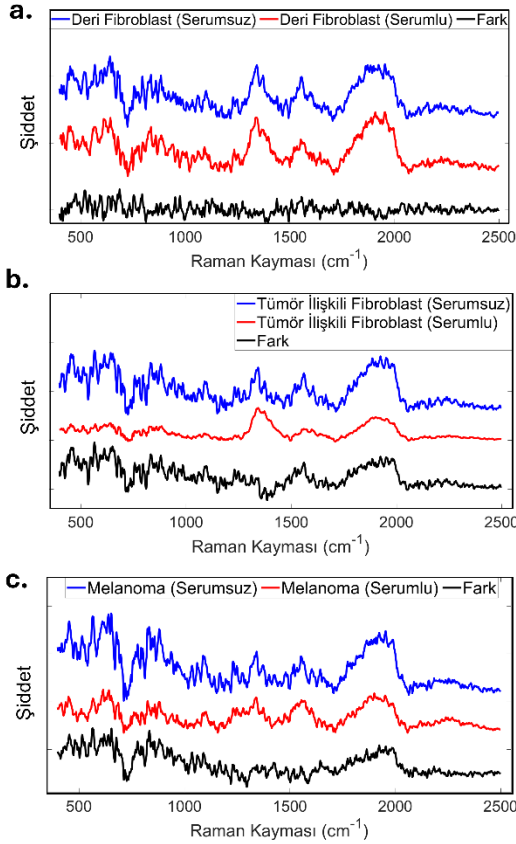
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Serum eklenen ve eklenmeyen ortamlarda büyütülen hücrelere ait YZRS spektrumları

Hücre kültür ortamına eklenen serumun normal deri fibroblast, tümör ilişkili fibroblast ve melanoma hücrelerine etkisini incelemek için hücrelerden toplanan YZRS spektrumlarının ortalamalarına ait grafikler Şekil 2a, 2b ve 2c’de verilmiştir. Şekil 2a’da normal deri fibroblast hücrelerinin kültür ortamına serum eklenmeden (%0 serum) ve serum eklenerek (%10 serum) büyütüldüğünde elde edilen YZRS spektrumlarının ortalaması verilmiştir. Verilen şekilde serum eklenen ve eklenmeyen gruplar arasındaki en az farklılığın Şekil 2a’da görülen normal deri fibroblast hücreleri arasında olduğu görülmektedir. Şekil 2a’daki fark spektrumu incelendiğinde iki grup için Raman kaymalarına ait dalga boyları büyük oranda aynı konumlarda olmakla birlikte spektral pik şiddetlerinde az miktarda da olsa farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 2b’de verilen tümör ilişkili fibroblast hücrelerine ait serum eklenen ve eklenmeyen kültürlerden elde edilen ortalama YZRS spektrumları incelendiğinde hem spektral piklerin konumları hem de şiddetleri arasında önemli farklılıklar mevcuttur. Burada, serum eklenmeyen tümör ilişkili fibroblast hücreleri serum eklenen hücre kültür ortamına göre daha belirgin ve şiddetli Raman spektrumları elde edilmiştir. Burada 400-1250 cm^{-1} bölgesinde yer alan piklerin şiddeti serum eklenen örneklerde oldukça düşük seviyede seyretmektedir. Bu bölgedeki YZRS piklerinin oluşmasına katkı veren çok sayıda biyomolekül mevcuttur. Bunlara polisakkarit, nükleik asit, protein gibi yapılar örnek olarak verilebilir [30]. 1330 cm^{-1} civarındaki spektral bölge literatürde DNA ve

fosfolipitler ile ilişkilendirilmiştir [31]. 1560 cm^{-1} civarındaki pik ise triptofan ve COO^- kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır [30]. Şekil 2c’de verilen melanoma hücrelerine ait ortalama YZRS spektrumlarında serum eklenmeyen hücrelerin spektrumlarında diğer hücre türlerinde olduğu gibi pik şiddetlerinde önemli farklılıklar görülmektedir. Şekil 2’de serum eklenen ve eklenmeyen hücre gruplarına ait YZRS spektrumlarında özellikle tümör ilişkili hücreler ve melanoma hücrelerinde spektrumların farklılaştığı görülmektedir.

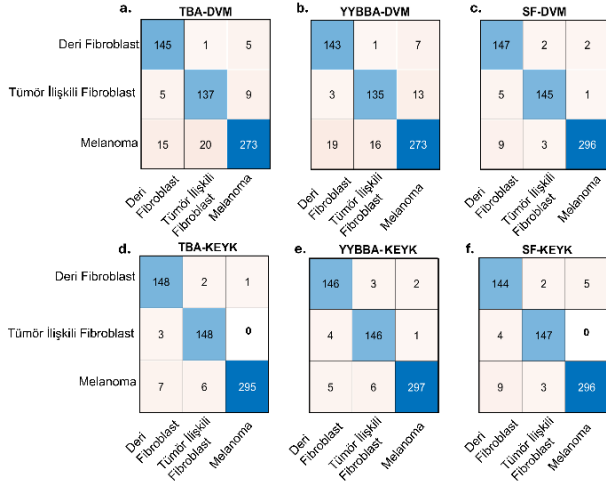
Hücre kültür ortamına serum eklenmesi, serum içeriğinde bulunan çeşitli besinler, büyüme faktörleri, hormonlar ve proteinler gibi bileşenlerden dolayı serum eklenen ve eklenmeyen hücre gruplarının biyokimyasal yapısını ve metabolik faaliyetlerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Serum içeriğinde bulunan yüksek miktarda protein ve aminoasit, hücrelerin biyokimyasal aktiviteleri ve protein sentezi üzerinde önemli etkiye sahip olabilmektedir. Ayrıca serum içeriğinde bulunan lipid ve karbonhidrat gibi moleküller hücre zar yapısında ve enerji depolama ya da harcama süreçlerinde değişikliğe neden olabilmektedir [32,33]. Bütün bu değişiklikler göz önüne alındığında hücre kültür ortamına serum eklenen ve eklenmeyen hücrelerin YZRS spektrumların da farklılıklar görüleceği açıktır.



Şekil 2. Serum içermeyen ve serum içeren ortamlarda büyütülen a. normal deri fibroblast, b. tümör ilişkili fibroblast ve c. melanoma hücrelerine ait ortalama ve fark YZRS spektrumları

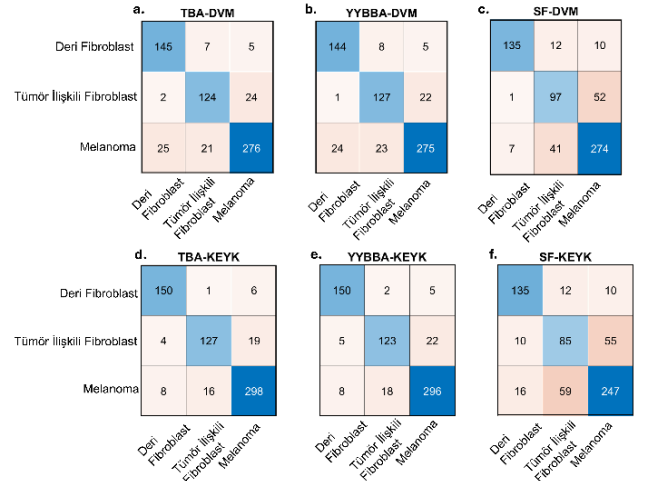
3.2 Serum eklenen ve eklenmeyen hücre kültür ortamlarında büyütülen hücrelerin sınıflandırılması

Hücre kültür ortamına serum eklenen ve eklenmeyen 3 grup hücrenin sınıflandırma başarılarını araştırmak için öncelikle hücrelere ait spektrumlarından öz nitelik çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırıcıların sınıflandırma başarısı çıkarılan öz niteliklere bağlı olduğundan 3 farklı öz nitelik çıkarma yöntemi kullanılmıştır. TBA, YYBBA ve SF öz nitelik çıkarma yöntemleri kullanılarak serum içeren ve içermeyen hücre gruplarından 50 öz nitelik çıkarılıp DVM ve KEYK sınıflandırıcılarının girişlerine uygulanmıştır. Sınıflandırıcı performansları 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak objektif olarak değerlendirilmiştir. Hücre kültür ortamına serum eklenmeyen hücrelerden elde edilen YZRS spektrumlarına ait sınıflandırıcı performanslarını gösteren karmaşıklık matrisi Şekil 3’te görülmektedir. Verilen matriste satırlar her bir sınıf etiketine ait gerçek sayıları, sütunlar ise ilgili sınıf etiketine ait model tarafından tahmin edilen sayıları göstermektedir. Matrisin köşegeni üzerinde yer alan sayılar sınıflandırıcı tarafından doğru olarak sınıflandırılan sınıf etiketine ait sayıları göstermektedir. TBA, YYBBA ve SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp DVM ile sınıflandırılan örnekler için karmaşıklık matrisi Şekil 3a, 3b ve 3c’de verilmiştir. TBA-DVM için 91 ± 0.5 , YYBBA-DVM 90.3 ± 0.63 ve SF-DVM 96.4 ± 0.4 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Şekil 3d, 3e ve 3f’de ise TBA, YYBBA ve SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp KEYK algoritması ile sınıflandırılan örnekler için karmaşıklık matrisleri verilmiştir. TBA-KEYK için 96.8 ± 0.29 , YYBBA-KEYK için 96.5 ± 0.24 ve SF-KEYK için 96.2 ± 0.19 sınıflandırma doğruluğu bulunmuştur. Sınıflandırma sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Burada verilen sonuçlar değerlendirildiğinde KEYK algoritmasının serum içermeyen ortamda kültürlenmiş hücrelerden elde edilen spektrumların sınıflandırılmasında 3 öz nitelik çıkarma yöntemi kullanıldığında da yüksek bir sınıflandırma başarısı verdiği görülmektedir. DVM ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde SF ile çıkarılan öz nitelikler en yüksek sınıflandırma başarısını verirken TBA ve YYBBA yöntemlerinden elde edilen öz niteliklerin sınıflandırma başarısı SF’ye kıyasla bir miktar düşük olarak elde edilmiştir. Melanomanın tespitinde, serum içermeyen ortamda kültürlenmiş hücrelerden elde edilen YZRS spektrumlarını sınıflandırmak için YYBBA ve SF öz nitelik çıkarma yöntemleri DVM ve KEYK algoritmalarıyla birlikte kullanıldığında oldukça yüksek sınıflandırma doğrulukları bulunmuştur. Bununla birlikte en yüksek sınıflandırma doğruluğu TBA ve KEYK algoritması birlikte kullanıldığında elde edilmiştir. Şekil 3d’de deri fibroblast hücrelerine ait 3 spektrum, tümör ilişkili fibroblastta ait 3 spektrum ve melanomaya ait 13 spektrum yanlış olarak sınıflandırılmıştır. Böylece 1239 spektrumdan yalnızca 19 spektrum yanlış sınıflandırılarak oldukça yüksek bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir.



Şekil 3. Serum eklenmeyen ortamda büyütülen hücrelere ait YZRS spektrumlarının farklı öz nitelik çıkarma yöntemleri ve sınıflandırıcılar kullanılarak elde edilen karmaşıklık matrisleri. a. TBA b. YYBBA c. SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp DVM ile sınıflandırılan örneklerin sınıflandırma sonuçları. d. TBA e. YYBBA f. SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp KEYK ile sınıflandırılan örneklerin sınıflandırma sonuçları

Şekil 4'te serum içeren ortamda büyütülen örneklerden elde edilen YZRS spektrumlarının sınıflandırma sonuçlarına ait karmaşıklık matrisleri görülmektedir. Bu kısımda toplanan YZRS spektrumlarının TBA, YYBBA ve SF ile öz nitelik çıkarımı yapıldıktan sonra DVM ve KEYK sınıflandırıcıları ile sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4a, 4b ve 4c'de spektrumların TBA, YYBBA ve SF öz nitelik çıkarma yöntemleri ile öz nitelikleri çıkarıldıktan sonra DVM ile sınıflandırılması neticesinde elde edilen karmaşıklık matrisleri verilmiştir. TBA-DVM %86.8±0.79, YYBBA-DVM için %86.6±0.64 ve SF-DVM için %80.5±0.72 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Şekil 4d, 4e ve 4f'de ise spektrumların öz nitelikleri çıkarıldıktan sonra KEYK algoritması kullanılarak sınıflandırılması neticesinde elde edilen karmaşıklık matrisleri verilmiştir. Burada da TBA-KEYK için %91.4±0.36, YYBBA-KEYK için %90.5±0.44 ve SF-KEYK için %74±0.66. sınıflandırma doğrulukları elde edilmiştir. Sınıflandırma sonuçları Tablo 2'de görülmektedir. Serum içeren ortamda kültürlenmiş hücrelerden elde edilen spektrumların sınıflandırma başarıları incelendiğinde en başarılı sonucu %91.4±0.36 doğruluk ile TBA ile öz nitelik çıkarımı yapıp KEYK algoritması kullanılarak sınıflandırılan örneklerden elde edilmiştir. Buna ait karmaşıklık matrisi Şekil 4d'de deri fibroblast hücrelerine ait 7 spektrum, tümör ilişkili fibroblastta ait 23 spektrum ve melanomaya ait 24 spektrum yanlış olarak sınıflandırılmıştır. Böylece 1239 spektrumdan 54 spektrum yanlış sınıflandırılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan veri setinde hem serum eklenen hem de eklenmeyen ortamdan toplanan YZRS spektrumlarında melanoma hücrelerinden toplanan YZRS spektrumlarının



Şekil 4. Serum eklenen ortamda büyütülen hücrelere ait YZRS spektrumlarının farklı öz nitelik çıkarma yöntemleri ve sınıflandırıcılar kullanılarak elde edilen karmaşıklık matrisleri. a. TBA b. YYBBA c. SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp DVM ile sınıflandırılan örneklerin sınıflandırma sonuçları. d. TBA e. YYBBA f. SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp KEYK ile sınıflandırılan örneklerin sınıflandırma sonuçları

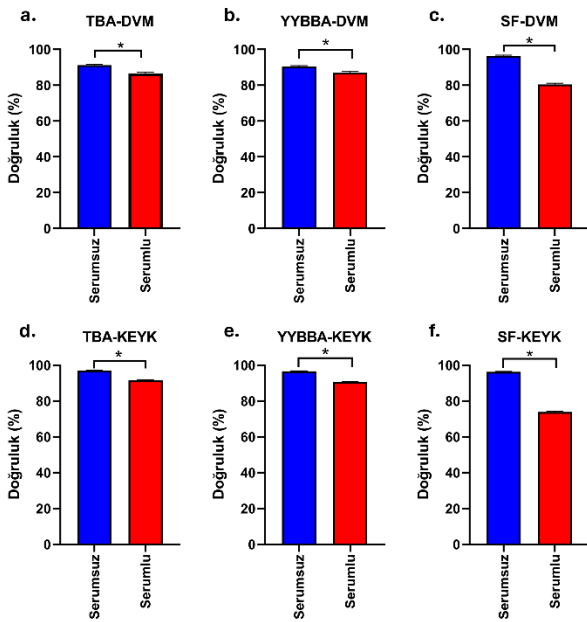
sayısı diğer hücre gruplarından fazladır. Şekil 3 ve 4'te verilen karmaşıklık matrisleri incelendiğinde sınıflar arasındaki bu dengesizliğin, sınıflandırıcı modellerinin dengesiz sınıflar lehine yanlış öğrenmesine yol açmadığı görülmektedir. Burada kullanılan çapraz doğrulama yöntemi sayesinde veri seti defalarca eğitim-test sürecine tabi tutulmaktadır. Dengesiz sınıflara sahip veri setlerinde, model bazen tesadüfen bir eğitim-test setinde iyi performans gösterebilir. Çapraz doğrulama, veri setini tekrar tekrar kullanarak bu durumu dengelemektedir.

Tablo 2. Serum eklenen ve eklenmeyen ortamda büyütülen hücrelere ait spektrumların sınıflandırma sonuçları

Serum eklenmeyen ortamda büyütülen hücrelere ait sınıflandırma doğruluğu (%) ± standart sapma sonuçları			
	TBA	YYBBA	SF
DVM	%91±0.5	%90.3±0.63	%96.4±0.4
KEYK	%96.8±0.29	%96.5±0.24	%96.2±0.19
Serum eklenen ortamda büyütülen hücrelere ait sınıflandırma doğruluğu (%) ± standart sapma sonuçları			
	TBA	YYBBA	SF
DVM	%86.8±0.79	%86.6±0.64	%80.5±0.72
KEYK	%91.4±0.36	%90.5±0.44	%74±0.66

Şekil 3 ve 4'te elde edilen sonuçlara göre melanomanın tespitinde serum eklenmeyen ortamda kültürlenmiş hücre gruplarından elde edilen spektrumların sınıflandırma sonuçlarının serum eklenen ortamda kültürlenmiş hücre

gruplarından elde edilen spektrumların sınıflandırma başarılarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu sonuçların istatistiksel analiz ile desteklenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Mann-Whitney U test kullanılmıştır. Şekil 5'te serum eklenen ve eklenmeyen ortamlarda kültürlenmiş hücrelerden elde edilen spektrumların 3 öz nitelik çıkarma yöntemi ile öz nitelikleri çıkarıldıktan sonra DVM ve KEYK algoritması ile bulunan sınıflandırma sonuçlarının Mann-Whitney U test ile istatistiksel analiz sonuçları görülmektedir. Verilen 6 durum için de $p < 0.001$ bulunmuştur. Bu durum serum eklenen ve eklenmeyen ortamlardan elde edilen spektrumların sınıflandırma başarıları arasında anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Serum eklenen ve eklenmeyen ortamlarda kültürlenmiş hücrelerin TBA, YYBBA ve SF öz nitelik çıkarma yöntemleri ve DVM ve KEYK algoritmaları kullanılarak elde edilen sınıflandırma doğruluklarının Mann-Whitney U test ile bulunan istatistiksel analiz sonuçları. a. TBA b. YYBBA c. SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp DVM ile sınıflandırılan serum içeren ve içermeyen örneklerin istatistiksel analiz sonuçları d. TBA e. YYBBA f. SF ile öz nitelik çıkarımı yapıp KEYK ile sınıflandırılan serum içeren ve içermeyen örneklerin istatistiksel analiz sonuçları. * $p < 0.001$ bulunmuştur.

Şu ana kadar verilen sonuçlar kapsamında hücre kültür ortamına serum eklenmeyen hücrelerden toplanan spektrumların daha yüksek sınıflandırma başarısına sahip olduğu görülmektedir. Farklı öz nitelik çıkarım yöntemleri sınıflandırıcı başarısını değiştirebildiğinden çalışma kapsamında TBA, YYBBA ve SF olmak üzere 3 farklı öz nitelik çıkarım yöntemine yer verilmiştir. Bu yöntemlerden TBA ve YYBBA verilerden doğrusal öz nitelikler çıkarırken SF doğrusal olmayan öz nitelikler çıkarmaktadır. Serum eklenmeyen grupta SF yöntemi kullanılarak öz nitelik çıkarımı yapıp DVM veya KEYK algoritmaları ile

sınıflandırıldığında diğer öz nitelik çıkarma metodları ile oldukça yakın sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir. Öte yandan serum eklenen grupta SF yöntemi kullanılarak öz nitelik çıkarımı yapıp DVM veya KEYK algoritmaları ile sınıflandırıldığında diğer öz nitelik çıkarma metodlarından daha düşük sınıflandırma sonuçlarına ulaşılmıştır. Doğrusal olmayan öz nitelik çıkarım metodları bazı durumlarda doğrusal yöntemlerden daha yüksek sonuç sağlayabildiği gibi [22] bazı durumlarda da daha düşük sonuç verebilmektedir. Bu durum kullanılan veri setinin yapısına bağlı olarak değişebilmektedir. Serum eklenen hücrelere ait YZRS spektrumlarının sınıflandırılmasında KEYK algoritması ile birlikte kullanılan her 3 öz nitelik çıkarım yöntemi de birbirine oldukça yakın şekilde sınıflandırma doğruluğu sağlamıştır. Fakat en yüksek sınıflandırma doğruluğunu hem serum içeren hem de içermeyen grupta KEYK sınıflandırma algoritması ile birlikte kullanılan TBA öz nitelik çıkarım yönteminin sağladığı görülmektedir. TBA ile birlikte kullanılan KEYK sınıflandırma yöntemi YZRS spektrumlarının sınıflandırılmasında başarılı sonuçlar üretmektedir [34]. Burada kullanılan DVM ve KEYK algoritmaları birbirine yakın sınıflandırma sonuçları vermekle birlikte en yüksek sınıflandırma doğruluğunun KEYK algoritması tarafından sağlanmasının birkaç sebebi olabilir. Verilerin farklı sınıflara iyi ayrılmış olduğu, ancak bu ayrımın daha bölgesel düzeyde olduğu bir veri dağılımı söz konusuysa, KEYK algoritması bu bölgesel sınırları DVM'den daha iyi yakalamış olabilir. Bir diğer neden özellikle sınıfların birbirine karıştığı bölgelerde DVM'nin doğrusal olmayan sınırları, KEYK algoritmasının bölgesel komşu ilişkilerine göre daha zayıf performans göstermiş olabilir [35].

Hücre kültür ortamına serum eklenen hücrelerden elde edilen YZRS spektrumlarının sınıflandırma başarısının düşük olması çeşitli sebeplerden kaynaklanabilir. Serum; çeşitli proteinler, lipitler ve diğer biyomolekülleri içerir ve bunlar YZRS sinyaline katkıda bulunabilir. Bu ek bileşenler, spektral karmaşıklığı artırarak hücrel bileşenlere özgü sinyalleri izole etmeyi zorlaştırabilir. Örneğin, serumda bulunan besin maddelerinin ve proteinlerin hücreler tarafından alınmasındaki değişiklikler, hücre metabolizmasında ve zar kompozisyonunda değişikliklere neden olabilir. Bu nedenle hücre kültür ortamına eklenen serum, hücrelerden toplanan YZRS spektrumlarını etkileyebilmektedir. Bu durum, sağlıklı ve kanserli hücrelerden toplanan spektrumların ayırt edilmesini zorlaştıracak şekilde spektrumda yeni piklerin oluşumu veya pik şiddetlerinde değişimlere sebep olmuş olabilir. Literatürde ortama eklenen serumun hücrelerden toplanan Raman ya da YZRS spektrumlarının üzerindeki etkilerini gösteren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bunun yerine farklı kültür ortamından kaynaklanan biyokimyasal değişikliklerin Raman spektroskopisi ile tespitine dayalı bir çalışma mevcuttur [36]. Gargotti vd. tarafından yapılan bu çalışmada HeLa ölümsüzleştirilmiş insan servikal hücreleri ve HaCaT dermal hücreleri, üç farklı yüzeyde kültüre edilmiştir. Farklı yüzeylerde yetiştirilen her iki hücre tipi üzerinde gerçekleştirilen bu çalışma, in vitro hücre kültürü ortamının hücre döngüsü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu

göstermiştir. Bakteri hücreleri üzerine yapılan çalışmalarda ise bakterilerin büyütülmesi için kullanılan farklı besiyerlerinin bakteriden elde edilen spektrumlarda değişiklik meydana getirdiği rapor edilmiştir [37,38]. Mevcut çalışmalar, hücre kültür ortamında yapılan değişikliklerin hücreler üzerinde çeşitli biyokimyasal değişiklikler meydana getirdiğini ve bu değişikliklerin Raman ya da YZRS ile tespit edilebildiğini göstermektedir. Erzina vd. [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada toplanan ve halka açık olarak paylaşılan veri setinde hücre kültür ortamına serum eklenen ve eklenmeyen hücrelerden elde edilen YZRS spektrumlarında farklılıklar meydana geldiği görülmektedir. Fakat meydana gelen bu farklılıkların kanserli ve sağlıklı hücrelere ait spektrumların ayrıştırılmasında nasıl bir etki yaratacağı şu ana kadar araştırılmamıştır.

Bu çalışma kapsamında hücre kültür ortamına serum eklenerek ve eklenmeden kültürlenmiş normal deri fibroblast, tümör ilişkili fibroblast ve melanoma hücrelerine ait spektrumlarda meydana gelen farklılıkların hücrelerin makine öğrenme teknikleri ile ayırt edilme başarısına olan katkısı ölçülmüştür. Elde edilen bulgular serum eklenmeyen ortamda kültürlenmiş hücre gruplarından elde edilen YZRS spektrumlarının daha yüksek bir sınıflandırma başarısı ile ayırt edilebildiğini göstermiştir.

4 Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında oldukça agresif bir kanser türü olan melanomanın YZRS ve makine öğrenme teknikleri ile tespitinde hücre kültür ortamına eklenen serumun sağlıklı, tümör ilişkili ve melanoma hücrelerinin sınıflandırılması üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaç için hücre kültür ortamına serum eklenen ve eklenmeyen hücrelerin YZRS spektrumları toplanarak farklı öz nitelik çıkarma metodları ile öz nitelik çıkarımı yapılmış ve DVM ve KEYK algoritmaları ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Serum eklenmeyen ortamda kültürlenmiş normal deri fibroblast, tümör ilişkili fibroblast ve melanoma hücrelerine ait YZRS spektrumlarından TBA, YYBBA ve SF yöntemleri ile öz nitelikler çıkarılıp sınıflandırıldığında serum eklenmeyen ortamdaki hücrelerden elde edilen YZRS spektrumlarının sınıflandırma başarısının daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Burada TBA ve KEYK algoritması birlikte kullanıldığında sınıflandırma doğruluğu 96.8 ± 0.29 olarak elde edilmiştir. Serum içeren ve içermeyen ortamda kültürlenmiş hücre gruplarının sınıflandırma başarıları arasında istatistiksel açıdan da anlamlı bir fark bulunmuştur. Sonuç olarak melanomanın sağlıklı ve tümör ilişkili hücrelerden ayırt edilmesinde YZRS ve makine öğrenme teknikleri birlikte kullanıldığında oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Kültür aşamasında hücre ortamına serum eklenmeyen sağlıklı, tümör ilişkili fibroblast ve melanoma hücrelerinin YZRS spektrumlarının sınıflandırma başarısında serum eklenen gruba göre istatistiksel olarak anlamlı seviyede fark bulunmuştur. Bununla birlikte burada serum eklenen ve eklenmeyen hücre gruplarından elde edilen YZRS spektrumlarındaki farklılaşmaları anlayabilmek için serumun hücre metabolizması üzerine etkisinin kapsamlı olarak araştırılacak çalışmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca bu

çalışma kapsamında yalnızca deri fibroblast, tümör ilişkili fibroblast ve melanoma hücrelerinden toplanan spektrumlar kullanılarak ortama eklenen serumun sınıflandırma başarısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçların genelleştirilebilmesi için diğer hücre gruplarında yapılacak benzer çalışmalara ihtiyaç vardır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan açık kaynaklı veri setini sağladıkları için Trelin A. vd.'ne teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı: %7

Kaynaklar

- [1] X. Ma, H. Yu, Global Burden of Cancer, *Yale J Biol Med* 79, 85–94, 2006.
- [2] H. Sung, J. Ferlay, R.L. Siegel, M. Laversanne, I. Soerjomataram, A. Jemal, F. Bray, Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries, *CA: A Cancer Journal for Clinicians* 71, 209–249, 2021.
- [3] C.C. Compton, D.R. Byrd, J. Garcia-Aguilar, S.H. Kurtzman, A. Olawaiye, M.K. AJCC Cancer Staging Manual and Handbook, Springer, New York, NY, 2012.
- [4] Melanoma of the Skin- Cancer Stat Facts, <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/melan.html> (Son Erişim 18 Ağustos 2024).
- [5] G.C. Karakousis, B.J. Czerniecki, *Diagnosis of Melanoma, PET Clinics* 6, 1–8, 2011.
- [6] Z. Al-Shaebi, F. Uysal Ciloglu, M. Nasser, M. Kahraman, O. Aydin, *Staphylococcus Aureus-Related antibiotic resistance detection using synergy of Surface-Enhanced Raman spectroscopy and deep learning, Biomedical Signal Processing and Control* 91, 105933, 2024.
- [7] M. Akdeniz, F.U. Ciloglu, C.U. Tunc, U. Yilmaz, D. Kanarya, P. Atalay, O. Aydin, Investigation of mammalian cells expressing SARS-CoV-2 proteins by surface-enhanced Raman scattering and multivariate analysis, *Analyst* 147, 1213–1221, 2022.
- [8] X. Li, G. Yang, S. Zhang, H. Ren, Advancing clinical cancer care: Unveiling the power of surface-enhanced Raman spectroscopy, *Journal of Raman Spectroscopy* 55, 429–444, 2024.
- [9] W. Li, C. Yang, H. Zhao, M. Sun, Z. Bao, Surface enhanced Raman spectroscopy on diagnosis of malignant tumors, *Applied Spectroscopy Reviews* 59, 678-709, 2023.
- [10] D. Cialla, A. März, R. Böhme, F. Theil, K. Weber, M. Schmitt, J. Popp, Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS): progress and trends, *Anal Bioanal Chem* 403, 27–54, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-5631-x>.
- [11] X. Zhu, T. Xu, Q. Lin, Y. Duan, Technical Development of Raman Spectroscopy: From

- Instrumental to Advanced Combined Technologies, *Applied Spectroscopy Reviews* 49, 64–82, 2014. <https://doi.org/10.1080/05704928.2013.798801>.
- [12] Y. Qi, D. Hu, Y. Jiang, Z. Wu, M. Zheng, E.X. Chen, Y. Liang, M.A. Sadi, K. Zhang, Y.P. Chen, Recent Progresses in Machine Learning Assisted Raman Spectroscopy, *Advanced Optical Materials* 11, 2203104, 2023. <https://doi.org/10.1002/adom.202203104>.
- [13] H. Shin, S. Oh, S. Hong, M. Kang, D. Kang, Y. Ji, B.H. Choi, K.-W. Kang, H. Jeong, Y. Park, S. Hong, H.K. Kim, Y. Choi, Early-Stage Lung Cancer Diagnosis by Deep Learning-Based Spectroscopic Analysis of Circulating Exosomes, *ACS Nano* 14, 5435–5444, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09119>.
- [14] X. Qiu, X. Wu, X. Fang, Q. Fu, P. Wang, X. Wang, S. Li, Y. Li, Raman spectroscopy combined with deep learning for rapid detection of melanoma at the single cell level, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 286, 122029, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.122029>.
- [15] J. Wang, Y.-C. Kao, Q. Zhou, A. Wuethrich, M.S. Stark, H. Schaidler, H.P. Soyer, L.L. Lin, M. Trau, An Integrated Microfluidic-SERS Platform Enables Sensitive Phenotyping of Serum Extracellular Vesicles in Early Stage Melanomas, *Advanced Functional Materials* 32, 2010296, 2022. <https://doi.org/10.1002/adfm.202010296>.
- [16] M. Yousuff, R. Babu, Deep autoencoder based hybrid dimensionality reduction approach for classification of SERS for melanoma cancer diagnostics, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 43, 7647–7661, 2022. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212777>.
- [17] M. Erzina, A. Trelin, O. Guselnikova, B. Dvorankova, K. Strnadova, A. Perminova, P. Ulbrich, D. Mares, V. Jerabek, R. Elashnikov, V. Svorcik, O. Lyutakov, Precise cancer detection via the combination of functionalized SERS surfaces and convolutional neural network with independent inputs, *Sensors and Actuators B: Chemical* 308, 127660, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127660>.
- [18] H.E.E. Duruel, N.S. Çağan, S. Işık, F.E. Kayhan, Hücre Kültürlerine Genel Bakış, *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 47, 136–149, 2021. <https://doi.org/10.35238/sufefd.935531>
- [19] S. Weiskirchen, S.K. Schröder, E.M. Buhl, R. Weiskirchen, A Beginner's Guide to Cell Culture: Practical Advice for Preventing Needless Problems, *Cells* 12, 682, 2023. <https://doi.org/10.3390/cells12050682>.
- [20] T. Yao, Y. Asayama, Animal-cell culture media: History, characteristics, and current issues, *Reprod Med Biol* 16, 99–117, 2017. <https://doi.org/10.1002/rmb2.12024>.
- [21] A. Verma, M. Verma, A. Singh, Animal tissue culture principles and applications, *Animal Biotechnology* 269–293, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811710-1.00012-4>.
- [22] F.U. Ciloglu, M. Hora, A. Gundogdu, M. Kahraman, M. Tokmakci, O. Aydin, SERS-based sensor with a machine learning based effective feature extraction technique for fast detection of colistin-resistant *Klebsiella pneumoniae*, *Analytica Chimica Acta* 1221 340094, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340094>.
- [23] A.H. Arslan, F.U. Ciloglu, U. Yilmaz, E. Simsek, O. Aydin, Discrimination of waterborne pathogens, *Cryptosporidium parvum* oocysts and bacteria using surface-enhanced Raman spectroscopy coupled with principal component analysis and hierarchical clustering, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 267, 120475, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120475>.
- [24] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, 2nd Edition, Springer, 2002.
- [25] A. Hyvärinen, E. Oja, Independent component analysis: algorithms and applications, *Neural Networks* 13, 411–430, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(00\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(00)00026-5).
- [26] Q. Le, A. Karpenko, J. Ngiam, A. Ng, ICA with Reconstruction Cost for Efficient Overcomplete Feature Learning, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*, Curran Associates, Inc., 2011. <https://proceedings.neurips.cc/paper/2011/hash/233509073ed3432027d48b1a83f5fbd2-Abstract.html> (Son erişim 30 Nisan, 2024)
- [27] J. Ngiam, Z. Chen, S. Bhaskar, P. Koh, A. Ng, Sparse Filtering, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*, Curran Associates, Inc., 2011. https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2011/hash/192fc044e74dffe144f9ac5dc9f3395-Abstract.html (Son erişim 3 Mayıs, 2024).
- [28] Z. Zhang, Q. Yang, W. Zhou, A Feature Extraction Method Based on Sparse Filtering With Local Structure Preserved and Its Applications to Bearing Fault Diagnosis, *IEEE Access* 7, 160559–160572, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951409>.
- [29] P.E. McKnight, J. Najab, Mann-Whitney U Test, in: *The Corsini Encyclopedia of Psychology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0524>.
- [30] A.C.S. Talari, Z. Movasaghi, S. Rehman, I. ur Rehman, Raman Spectroscopy of Biological Tissues, *Applied Spectroscopy Reviews* 50, 46–111, 2015. <https://doi.org/10.1080/05704928.2014.923902>.
- [31] U. Utzinger, D.L. Heintzelman, A. Mahadevan-Jansen, A. Malpica, M. Follen, R. Richards-Kortum, Near-Infrared Raman Spectroscopy for in vivo Detection of Cervical Precancers, *Appl Spectrosc* 55, 955–959, 2001. <https://doi.org/10.1366/0003702011953018>.
- [32] J.P. Mather, P.E. Roberts, eds., *Serum-Free Culture*, in: *Introduction to Cell and Tissue Culture: Theory and Technique*, Springer, 1998.
- [33] R.G. Werner, W. Noé, Mammalian cell cultures. Part I: Characterization, morphology and metabolism, *Arzneimittelforschung* 43, 1134–1139, 1993.

- [34] F.U. Ciloglu, A.M. Saridag, I.H. Kilic, M. Tokmakci, M. Kahraman, O. Aydin, Identification of methicillin-resistant Staphylococcus aureus bacteria using surface-enhanced Raman spectroscopy and machine learning techniques, *Analyst* 145, 7559–7570, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0AN00476F>.
- [35] Christopher M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer New York, 2006.
- [36] M. Gargotti, E. Efeoglu, H.J. Byrne, A. Casey, Raman spectroscopy detects biochemical changes due to different cell culture environments in live cells in vitro, *Anal Bioanal Chem* 410, 7537–7550, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1371-5>.
- [37] C. Hanson, M.M. Bishop, J.T. Barney, E. Vargis, Effect of growth media and phase on Raman spectra and discrimination of mycobacteria, *Journal of Biophotonics* 12, e201900150, 2019. <https://doi.org/10.1002/jbio.201900150>.
- [38] K. Mlynáriková, O. Samek, S. Bernatová, F. Růžicka, J. Ježek, A. Hároniková, M. Šiler, P. Zemánek, V. Holá, Influence of Culture Media on Microbial Fingerprints Using Raman Spectroscopy, *Sensors* 15, 29635–29647, 2015. <https://doi.org/10.3390/s151129635>

Ekler

Veri Kullanılabilirliği: Bu çalışma kapsamında kullanılan veri seti aşağıdaki adreste halka açık şekilde paylaşılmıştır. <https://www.kaggle.com/datasets/andriitrelin/cells-raman-spectra>

Kısaltmalar

YZRS	Yüzeyde Zenginleştirilmiş Raman Spektroskopisi
TBA	Temel Bileşen Analizi
YYBBA	Yeniden Yapılanma Bağımsız Bileşen Analizi
SF	Seyrek Filtreleme
DVM	Destek Vektör Makinası
KEYK	K en Yakın Komşu





Fuzzy logic-based simulation and modelling of grid integration renewable energy systems for sustainable energy

Sürdürülebilir enerji için şebekeye entegre yenilenebilir enerji sistemlerinin bulanık mantık tabanlı simülasyonu ve modellenmesi

Yavuz Bahadır Koca^{1,*} 

¹ Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Electrical Engineering, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

Abstract

There has been a more significant trend from fossil fuels to renewable energy sources in recent years due to energy crises, environmental problems and sustainability. Renewable energy systems have become very useful and important especially photovoltaic and wind. This study focuses on a hybrid energy system. This hybrid system includes photovoltaic and wind energy systems as a renewable energy source. In addition, a diesel generator as a backup power source and battery storage system is used. The system is controlled with a fuzzy logic control (FLC) and optimizes energy distribution and maintains balance. A maximum power point tracking controller is developed using the perturb and observe algorithm and FLC. The photovoltaic and wind energy, has been analyzed weather conditions. The photovoltaic system produces about 3.5 kW. The wind turbine produces about 3.5 kW at 12 m/s wind speed. The diesel generator provides 5 kVA of backup power during periods of low renewable energy production. The 1000 Ah battery ensures energy balance and supports peak demand with 90% efficiency. The simulation results represent a 30% reduction in fuel consumption. In addition, this provides a 15% increase in system efficiency. The proposed approach effectively demonstrates the integration of renewable energy for sustainable power production.

Keywords: Distributed energy systems, Fuzzy logic control, Hybrid power system, Renewable energy, Energy management.

1 Introduction

The fossil fuel-based energy crises experienced in recent years have revealed the benefits of renewable energy sources (RES) regarding energy security. Following the global energy crisis, many countries are placing greater emphasis on policies that support RES [1]. However, it is well-known that RES may not consistently perform at peak levels under all conditions [2]. There has been a growing trend towards hybrid energy systems (HES) to overcome this challenge. HES include combinations of fossil fuels and RES [3,4].

Öz

Son yıllarda enerji krizleri, çevresel sorunlar ve sürdürülebilirlik gibi faktörlerden dolayı fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru önemli bir eğilim gerçekleşmiştir. Özellikle fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi sistemleri, yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde oldukça kullanışlı ve önemli hale gelmiştir. Bu çalışma, bir hibrit enerji sistemine odaklanmaktadır. Bu hibrit sistem, yenilenebilir enerji kaynakları olarak fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi sistemlerini içermektedir. Ayrıca, bir yedek güç kaynağı olarak dizel jeneratör ve bir batarya depolama sistemi kullanılmaktadır. Sistem, bulanık mantık kontrol (BMK) sistemi ile kontrol edilmekte olup enerji dağıtımını optimize etmekte ve dengeyi sağlamaktadır. Bir maksimum güç noktası takip kontrolörü, pertübasyon ve gözlem algoritması ve BMK kullanılarak geliştirilmiştir. Fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi, hava koşulları altında analiz edilmiştir. Fotovoltaik sistem yaklaşık 3,5 kW üretim sağlamaktadır. Rüzgâr türbini, 12 m/s rüzgâr hızında yaklaşık 3,5 kW enerji üretmektedir. Düşük yenilenebilir enerji üretimi dönemlerinde, dizel jeneratör 5 kVA yedek güç sağlamaktadır. 1000 Ah kapasiteli batarya, enerji dengesini sağlamakta ve %90 verimlilikle talep artışlarını desteklemektedir. Simülasyon sonuçları, yakıt tüketiminde %30 oranında bir azalma olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, sistem verimliliğinde %15'lik bir artış sağlanmıştır. Önerilen yaklaşım, sürdürülebilir enerji üretimi için yenilenebilir enerjinin entegrasyonunu etkili bir şekilde göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Dağıtık enerji sistemleri, Bulanık mantık kontrol, Hibrit güç sistemleri, Yenilenebilir enerji, Enerji yönetimi

These systems generally have the potential to provide optimum performance throughout the year. RESs are very important in managing climate change and sustainably meeting the increasing global energy demand. These systems use energy from renewable sources such as solar, wind, geothermal, biomass, etc., to reduce dependence on fossil fuels and environmental impacts. For example, photovoltaic (PV) panels perform very well on summer days. Also, wind energy systems (WES) produce its highest power on windy days. PV systems have low maintenance costs and are less

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / ybkoca@aku.edu.tr (Y. B. Koca)

Geliş / Recieved: 16.02.2024 Kabul / Accepted: 16.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1438625

prone to potential failures due to having few or no moving parts. On the other hand, WES with moving components are more susceptible to failures. It leads to increased operating expenses [5].

HES reduce energy costs while increasing overall performance. Electricity production from PV and wind sources varies seasonally. In winter, it is impossible to meet all energy demands with PV energy alone. Similarly, wind energy production may be insufficient in summer or windless days. Different solutions can be developed to prevent these seasonal fluctuations. The system to be installed should include different alternative energy sources and energy storage systems. Battery systems, usually the most selected storage options, come to the fore. However, battery systems should also be designed in a way that takes into account the supply-demand balance. Rather than installing a battery system to meet demand power, it would be more appropriate to install it in a way that manages critical loads for a certain period. Because increasing the battery group capacity significantly increases the cost. Unlike battery packs, diesel generators can be a suitable backup energy source for situations where the electrical energy obtained from PV panels or wind turbines is insufficient [6]. While integrating battery packs increases the initial installation costs, using diesel generators increases the operating costs. Here, any increase in system costs can be kept to a minimum by correctly configuring the component dimensions and control strategies. It can sometimes even be reduced depending on the regional characteristics.

1.1 Literature survey

Microgrid systems integrating RES have the potential to provide reliable and sustainable power, especially in remote or underserved areas. These systems often combine solar, wind and energy storage technologies supported by diesel generators to ensure stability during periods of insufficient renewable generation.

Optimize energy management strategies is vital to balance power generation, storage and distribution among various RES such as solar, wind, biomass, fuel cells, etc. Gopu and Nagaraj [7], highlighted the use of a novel power management algorithm that dynamically allocates power among various sources and optimizes resource use in a microgrid environment. The study presents control methods such as sliding mode control and dual Kalman filter-based disturbance methods. A power management algorithm in the island microgrid is explained. Al-Ani et al. [8], demonstrated the integration of PV, wind and fuel cell technologies. ANN optimize grid availability and efficiency in grid-connected hybrid system power management.

Moreover, frequency stability is very important since RES is an irregular system. It is also necessary to maintain stability during transitions between grid-connected and island modes [9]. In general, integrating multiple renewable sources into grids increases energy resilience. It also contributes to lower greenhouse gas emissions by reducing dependence on fossil fuels [10]. Additional components in hybrid energy production systems incorporating multiple renewable sources complicate the system's structure and

control [11,12]. Another challenge with HES is achieving optimal sizing to minimize initial costs and maximize reliability. In this regard, electrical installations for standalone residential buildings are currently designed for an average power capacity of around 10 kW. For this group of residences, designing a system that adequately meets power demands will be sufficient.

Distinguishing characteristics exist between HES interconnected with the electrical grid and those that operate independently without grid connectivity. When a hybrid system is integrated with a centralized electrical grid, such as in distributed generation applications, there is a degree of simplification in the system design, reducing the number of components. In this scenario, the grid system can manage voltage and frequency regulation, potentially obviating the need for the hybrid system to control these parameters [12]. The grid system can compensate for the deficiency if the hybrid system's energy output falls short of demand. Conversely, any surplus energy the hybrid system generates can be fed back into the grid. However, it's worth that there are situations where the electrical grid does not exhibit characteristics of an unlimited data pathway, necessitating the incorporation of additional components and control mechanisms [13].

Maximum power point tracking (MPPT) is important in optimizing the performance of both PV and WES, ensuring that they operate at their highest efficiency levels. The energy produced by these renewable sources varies depending on the intensity of irradiance, temperature and wind speed [13]. MPPT is an important technology used in renewable energy systems, especially to optimize energy capture from solar and wind sources. In solar energy applications, the Perturb and Observe (P&O) algorithm is widely used to adjust the voltage and current of solar panels. It ensures that they operate at maximum power points despite fluctuating light conditions. This method has been shown to effectively maintain optimum performance in solar cell charging systems, as demonstrated in MATLAB/Simulink simulations [14]. MPPT techniques such as super twist sliding mode control (STSMC) and modified P&O have been developed in wind energy systems to improve power extraction from variable-speed turbines. The STSMC method offers robustness against disturbances and minimizes energy losses, while the modified P&O technique provides faster tracking capabilities [15,16]. Furthermore, integrating AI with MPPT can further increase efficiency by providing more adaptive and responsive tracking strategies, especially in complex scenarios such as partial shading [17]. In general, developing MPPT techniques is essential to maximize the efficiency of renewable energy systems [16,18].

Different optimization algorithms are used to manage uncertainties in RES. One of them is the fuzzy logic control (FLC) system. Fuzzy logic helps to keep the variable nature of renewable energy under control. It has been shown that Fuzzy inference system control strategies can optimize the power flow in microgrids and increase efficiency and stability while meeting various energy demands and storage systems [19].

Versaci and La Foresta [20], proposed a heuristic fuzzy Takagi-Sugeno approach to manage energy flows in DC microgrids. Integration of PV and WES with energy storage is presented to provide system reliability. Sahoo et al. [21] studied the system stability during load disturbances with a fuzzy-based PID controller. The wild goat algorithm optimizes the controller gains for improved performance in the study. In addition, FLCs have been shown to improve the stability of grid-connected PV systems by effectively managing changes in renewable energy output [22]. FLC techniques have also been developed for synchronous load converters, which show superior performance in voltage regulation and transient response compared to traditional methods. This is very important for the dynamic nature of renewable energy applications [23].

Generally, FLC provides a robust framework to improve the performance and reliability of renewable energy systems. Huang et al. [24] designed a system to optimize investment strategies in renewable energy projects. The study proposed a fuzzy decision-making model that shows the importance of quality and innovation in improving efficiency. Giri and Roy [25] use a fuzzy-random robust programming approach to develop a closed-loop renewable energy supply chain that manages waste-related uncertainties and environmental impacts. Ganga Bhavani et al. [26] used an adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) to control microgrid systems. They presented its effectiveness in improving power stability and efficiency. Giri et al. [27] used fuzzy graph theory for renewable energy resources in India. Singh et al. [28] presented the uncertain intuitive fuzzy sets algorithm that improves variety in RES applications. Collectively, these studies demonstrate different fuzzy methodologies used in optimizing and addressing the operational challenges of renewable energy systems.

FLCs can improve the performance of P&O and MPPT methods [29]. Ullah et al. [30] show that it can significantly increase system efficiency, reaching up to 97% in some simulations. Fuzzy MPPT systems are designed to track the maximum power point adaptively of PV modules, even in partial shading and rapid changes in insolation [31,32]. Comparative studies show that fuzzy controllers outperform traditional methods by reducing power fluctuations and increasing overall energy production [29,33]. One of the simplest methods is based on a PI controller and the P&O algorithm [34–38]. However, these methods may encounter challenges in delivering adequate performance. Another approach utilizes neural networks to predict wind speed. Generator speed is measured in advance, and then the control of generator speed is aimed at maximizing power extraction or deriving torque references for an operational point tracker [39]. In summary, fuzzy MPPT represents a robust solution to optimize PV system performance, addressing the limitations of traditional tracking methods while providing efficient energy conversion.

1.2 Contribution

This study presents an approach to optimizing grid-integrated RES performance by applying FLC and MPPT algorithms. It is developing and simulating a HES that

combines PV, WES, diesel generators and battery storage systems. The main contribution of the study is presented below.

- The study aims to provide uninterrupted and efficient energy under changing weather conditions.
- The research aims to protect the proposed system's energy balance and optimize resource use.
- It also demonstrates the system's durability, especially in stand-alone applications with limited or unavailable grid support.
- The system is essential in providing a cost-effective and environmentally friendly alternative to traditional energy systems, especially in rural or remote areas, to increase the sustainability of energy supply.

1.3 Organization

In this study, the structure of the hybrid power system and the descriptions are given in Section 2. The mathematical model of the PV system is first established and verified through simulations. In addition, FLC MPPT techniques are developed and analyzed under various weather conditions. Then, the wind energy conversion system and its performance analysis are examined according to the P&O algorithm. The diesel generator is modelled in the simulation environment and the results are presented. At the end of Section 2, the modelling of the battery group is given which acts as a backup power source and storage unit. Also, modelling for residential load applications is done in this section. Section 3 examines the microgrid integration of PV, WES, diesel generator and battery group systems. Performance analyses of these RESs under different operating conditions are performed. The developed models are explained separately for each source and the simulation results are evaluated. The discussion on the proposed HES is presented in Section 4. Lastly, the research conclusion and future studies are presented in Section 5.

2 Hybrid power system description

Design for a hybrid power system that can be installed for standalone residential loads via a low-voltage grid is presented in this study. The proposed system, integrated into the grid, comprises PV energy, wind energy, a diesel generator, a battery bank for energy storage, power switching elements and loads. This architecture is visually depicted in Figure 1. PV panels and wind turbines are utilized as primary power sources, designed to supply power to the loads and simultaneously charge the battery. The diesel generator serves as a backup power source and only activates when the battery falls below the minimum charge level. The electrical rated powers of all components used are designed as follows: the PV panel array is 3500 W, wind turbine is 4000 W, diesel generator is 5 kVA, battery capacity is 1000 Ah-24V and the total installed power for the loads is 10 kW.

2.1 PV System

PV panel production operates on the fundamental principle of the PV effect exhibited by semiconductors. This phenomenon enables the direct conversion of PV energy into electrical energy. PV cells, when exposed to sunlight,

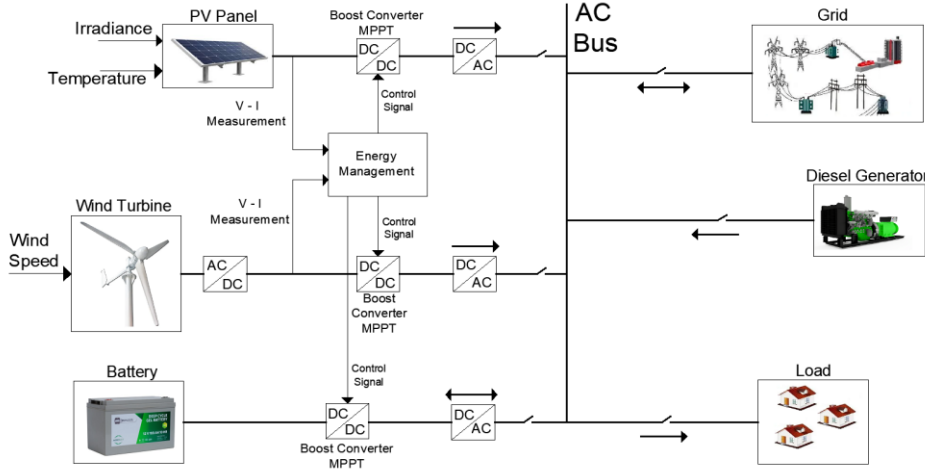


Figure 1. Distributed power system

produce an electric current as a result of this effect [40–42]. The output current of PV is dependent on the sunlight incident on the PV cell. Consequently, energy production from PV systems is not constant throughout the day due to weather variations. The efficiency of power generation varies with changes in PV irradiance and ambient temperature [43]. Hence, MPPT technologies play a significant role in optimizing power generation from PV systems under various weather conditions. The mathematical model of the modelled PV system in this study was obtained using Equations (1,5) [44,45]. The current at the output of the PV panel is provided in Equation (1).

$$I_{pv} = I_{ph}N_p - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{ph} = G_k[I_{sc} + K_I(T_{op} - T_{ref})] \quad (2)$$

$$I_d = I_s N_p \left[e^{\left(\frac{V + I_{pv} R_s}{n V_T N_s C} \right)} - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (4)$$

$$V_T = \frac{N_s n k T}{q} \quad (5)$$

Here,

V_T = Thermal voltage (V)

I_{pv} = PV panel output current (A)

I_{ph} = PV panel terminal phase current (A)

N_s, N_p = Number of PV panels

I_d = Diode current (A)

I_{sh} = Shunt current (A)

n = Diode constant

The designed PV system, featuring a fuzzy-based MPPT comprises two inputs and one output. Trapezoidal

membership functions were employed for the input and outputs. The defuzzification of the proposed fuzzy controller was carried out using the center of gravity method. The simulation was based on the parameters of a 260W CW brand PV panel manufactured in Türkiye.

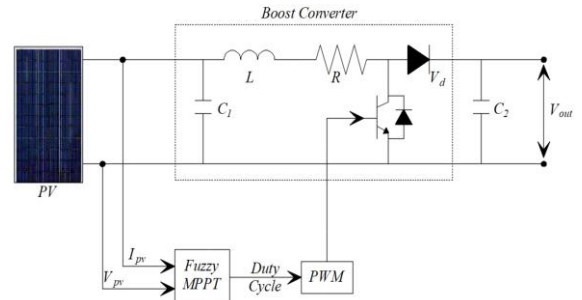


Figure 2. PV system

The MPPT fuzzy controller possesses two inputs, specifically the PV voltage and current. Figure 3 (a) provides the fuzzy logic controller diagram illustrating the voltage and current inputs. Based on these inputs, the MPPT fuzzy controller calculates the duty cycle and supplies it to the support converter shown in Figure 2. Figure 3 (b) presents the output fuzzy logic function. Ultimately, the fuzzy input-interference rules are devised by considering alterations in both PV voltage and current across a range of weather conditions.

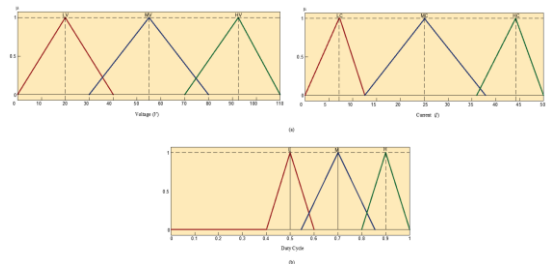


Figure 3. Fuzzy logic

The developed fuzzy logic controller was implemented and tested in a simulation environment, evaluating its performance under various weather conditions, including different levels of irradiance and temperature. Figure 4 shows the performance of the PV system for output power under various irradiance conditions. The above-designed fuzzy controller has been successfully implemented in a simulation program for a 3.5 kW PV system. At 1000 W/m² solar radiation, MPPT output power gives approximately 3600 W. These simulations demonstrate the effectiveness of the fuzzy controller in optimizing PV power generation. This study significantly contributes to developing renewable energy integration and offers alternative solutions for future energy management and efficiency.

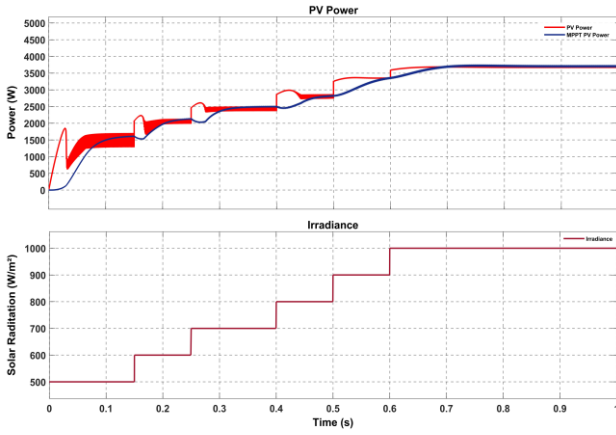


Figure 4. PV performance

2.2 Wind turbine system

WES stand out as one of the most abundant and promising resources for generating electrical energy. These systems harness the kinetic energy of the wind by utilizing turbines to convert it into mechanical energy. Subsequently, generators are employed to transform this mechanical energy into electrical energy. Consequently, the amount of wind energy produced is directly linked to the wind speed. The power generated by a wind turbine can be mathematically expressed through the following Equation (6) [46].

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) A \rho v^3 \quad (6)$$

Here,

P_w = Power generated by the wind turbine (W)

ρ = Density of the atmospheric gas (kg/m³)

A = Cross-sectional area of the wind turbine blade (m²)

V = Wind speed (m/s)

C_p = Wind turbine energy conversion coefficient

The energy conversion coefficient C_p are expressed as follows in Equation (7) [37].

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} \quad (7)$$

The MPPT control unit functions by continuously monitoring and tracking the maximum power point corresponding to each wind speed. It is important to note that the optimum power output of a wind turbine does not follow a linear pattern. It is somewhat similar to a bell-shaped curve. The system attempts to determine the highest power output for each wind speed to find the ideal rotation speed. An adjustment is made to provide the maximum power output for a given wind speed based on the rotation speed of the turbine. The wind generator includes three main components: a wind turbine, a permanent magnet synchronous generator (PMSG) and a power converter. All these components are controlled by an MPPT system as shown in Figure 5.

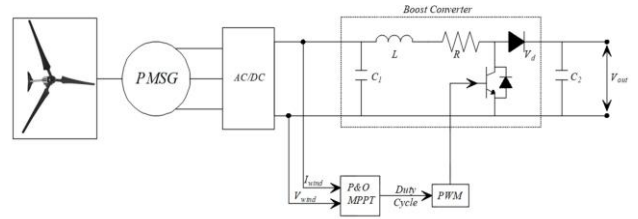


Figure 5. Wind energy system with MPPT controller

During power generation, a control strategy known as MPPT is utilized to manage the rotor speed of wind turbines by regulating the torque generated. This control approach, as depicted in Figure 5, focuses on optimizing power output. However, the blade pitching mechanism introduces a time delay in responding to changes in wind conditions, including turbulence and strong winds. This delay can impact energy production and subject the wind turbine structure to mechanical stress. In contrast, by applying electrical control to the generator rotor speed, improved electrical energy production can be achieved. MPPT-based control methods have been developed with the primary objective of reaching the highest possible power coefficient. In variable-speed WES, power electronics-based converters have proven to be effective in efficiently managing the generator's output power. The MPPT-based control technique for wind turbines involves adjusting rotor speed by regulating the production torque. Conversely, optimizing generator rotor speed through electrical control mechanisms can enhance electrical energy production.

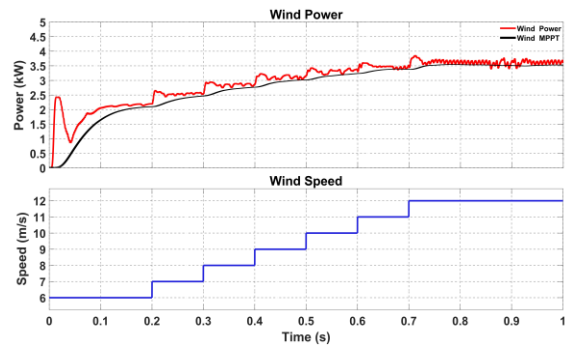


Figure 6. Wind performance

These methodologies based on MPPT principles play a crucial role in improving the efficiency and performance of variable-speed WES. The simulation results of wind energy conversion systems without MPPT and based on MPPT are analyzed. Figure 6 shows the output power of WES. The graph reveals that the wind turbine reaches an output of 3500 W when the wind speed reaches 12 m/s.

2.3 Diesel generator system

In this study, the focus has been on using a diesel generator to provide backup power. All energy sources, individually or in combination, are insufficient to meet the energy demand, an automatic controller with a selective switch has been used. In this scenario, the controller triggers a selective switch that activates the diesel generator when needed. If the main power source, i.e., the normal electrical source, is ready to supply the load, then the activation of the generator is automatically canceled. The output of the diesel generator is in the form of alternating current (AC). Figure 7 shows the block diagram of the diesel generator system. The voltage, current and power output performances of the diesel generator are given in Figure 8 and 9, respectively.

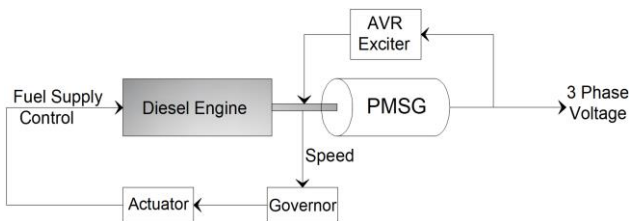


Figure 7. Block diagram of the diesel generator model

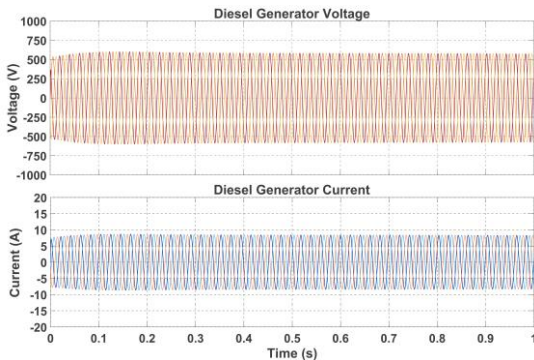


Figure 8. Diesel generator voltage and current output

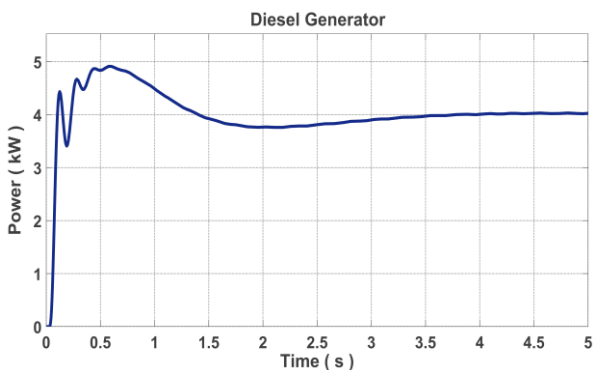


Figure 9. Diesel generator power output

2.4 Battery storage system

Battery storage systems play a critical role in scenarios where renewable energy sources prove inadequate to meet the electricity demand. These systems serve as backup power sources while simultaneously functioning as storage units for surplus electricity, allowing for its storage and subsequent use. The performance of the 1000Ah battery bank, which was subjected to simulation in this study, is depicted in Figure 10.

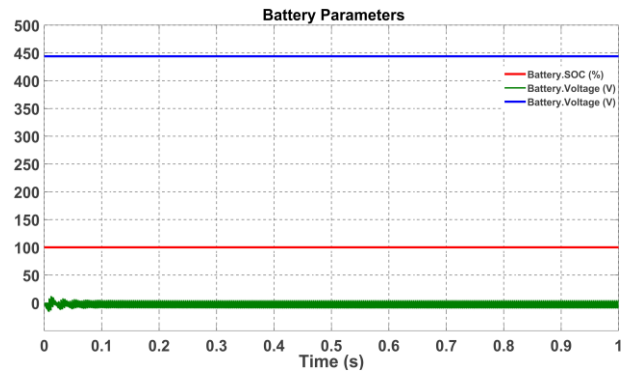


Figure 10. Battery output

3 Management of the distributed energy system and results

The proposed distributed energy system incorporates 3.5 kW PV, 4 kW WES, diesel generator and battery energy storage device that are connected to the electric distribution system. The above model was simulated in a simulation environment. Voltage source inverters play a crucial role in the grid integration of the PV system because PV generates only DC power, necessitating the conversion of DC power to AC power using inverters. The presented model is illustrated in Figure 11.

In this research study, fuzzy logic is employed as an energy management technique. In the designed system, the objective is to maximize power extraction from the PV system. This is achieved by connecting the PV system to the DC bus via a DC/DC converter controlled by an MPPT block.

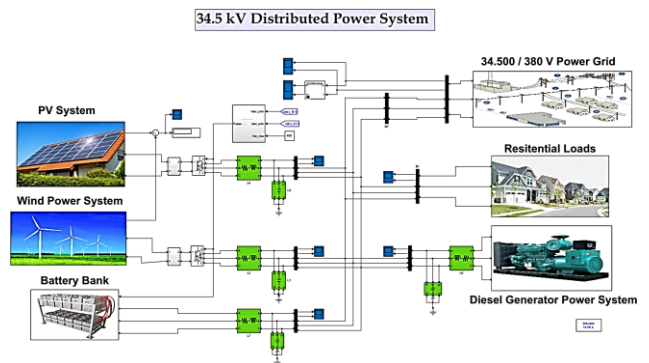


Figure 11. Proposed system simulation model

The generated power is transferred to the grid. To maximize the power output from the wind turbine integrated

into the system, an MPPT block and multiple converters are utilized to optimize it for the DC bus. Additionally, the battery system is linked to the microgrid through DC/AC conversion, ensuring effective energy management. Importantly, the energy management strategy in this system ensures that each component within the grid operates with its own controller. This setup provides independent control signals for each element, enabling them to function autonomously without relying on other energy sources. The waveform depicting the total output power is shown in Figure 12.

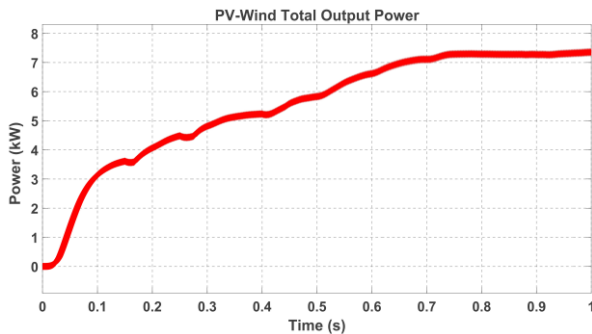


Figure 12. Total output power of the proposed system

Voltage and current profiles obtained from the battery bank are shown in Figure 13. These profiles provide information about the performance and behavior of the battery storage system under the proposed hybrid energy model. Analyzing these voltage and current profiles allows a comprehensive assessment of the battery's charging and discharging patterns, shedding light on its efficiency, state of charge and overall contribution to the system's energy supply.

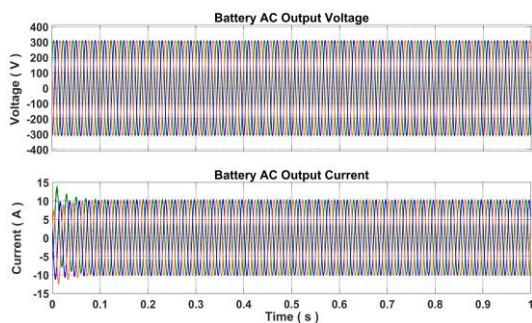


Figure 13. Energy storage system voltage and current output waveform

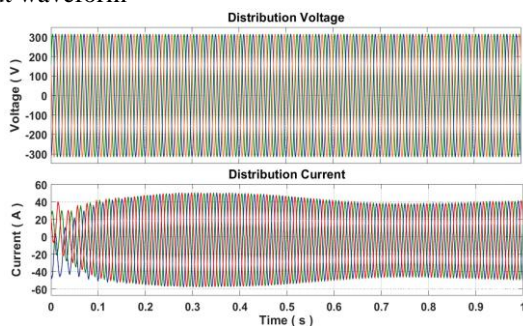


Figure 14. Distributed system voltage and current

The voltage and current waveforms of the proposed system are shown in Figure 14. The active and reactive power data obtained are presented in Figure 15. The graphical representation provides important information regarding power production and consumption, allowing evaluation of system performance in various operational scenarios.

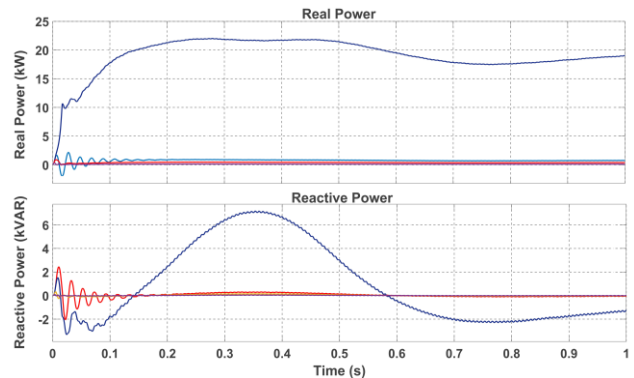


Figure 15. Proposed system real and reactive power waveform

4 Discussion

This study proposes a FLC system to optimize grid-integrated renewable energy sources in sustainable energy systems. The distributed energy system used in the study at a voltage level of 34.5 kV includes various energy sources such as PV, WES, diesel generators and battery banks. One of the most striking aspects of the study is integrating the MPPT algorithm with FLC to optimize energy production under different weather conditions. This system increases energy efficiency by dynamically managing the energy flow and ensures the most efficient use of resources. Simulation results show that this hybrid system provides fuel savings of 30% and increases system efficiency by 15% compared to traditional systems.

Usanova et al. [47] shows that a FLC energy management model optimizes RES integration in smart grids. This model provides a 20% improvement in energy usage, a 25% improvement in energy storage reliability and a 22% increase in overall system efficiency. These findings show that FLC is effective in the integration and management of variable energy resources. Farhan et al. [48] presented simulation results for a DC system consisting of only PV and battery groups. Shakir and Salem [49] examined a residential electrical energy system for a standalone grid fed by an FLC-based PV and battery group. Our study differs from other studies in this field and provides a more cost-effective and applicable solution to increase energy efficiency. At the same time, a grid-integrated system is proposed in the study using many different energy sources. However, one of the study's shortcomings is that the simulation results were evaluated only under certain conditions. Examining the performance of this approach in different climatic regions and larger-scale systems is essential for the generalizability of the findings.

5 Conclusion and suggestions

This study investigates a structure consisting of PV, Wind and battery systems along with a diesel generator system under different operational conditions and explores smart controller-based grid integration. The proposed system is modelled in a simulation environment. The MPPT algorithm is developed for the PV system with a FLC and evaluated under changing weather conditions. The energy management system is developed and tested under various power demands. The grid integration of the WES and PV system is simulated and analyzed under different operational conditions. A hybrid power system combining wind and PV energy is examined through simulations. Fuzzy logic-based MPPT control is applied to efficiently utilize wind and PV resources. This hybrid power system is designed to supply AC loads and can be used both grid-connected and off-grid, making it suitable for various applications, including remote areas, rural locations, and hill stations.

The Fuzzy logic-based effective energy management controller manages the hybrid power system, ensuring uninterrupted power supply, minimizing diesel generator usage, optimizing energy resource utilization and extending battery life. Reducing diesel generator usage helps minimize harmful gas emissions. The diesel generator increased the system's reliability by providing five kVA of backup power during low renewable energy production periods. Therefore, it can be successfully employed in any region or country, offering an environmentally friendly green energy system. The FLC algorithm achieved a 15% increase in energy efficiency and a 30% decrease in fuel consumption. These results were achieved by analyses in a simulation environment. When the performance of the PV system was examined, it was seen that the system was optimized with the MPPT algorithm and could produce 3.5 kW power. This situation allowed the PV system to maintain maximum power production even under variable radiation conditions. The wind turbine was optimized to produce about 3.5 kW power at 12 m/s wind speed. These optimizations led to an increase in energy production. The 30% decrease in fuel consumption is directly related to the system's energy management strategy. The diesel generator's activation only when renewable energy sources were insufficient significantly reduced fossil fuel use. This proposed system can be effectively used in any location requiring stable voltage and continuous power supply.

In future studies, there is a consideration to focus on different energy management approaches, especially with the rapid integration of electric vehicles into the system. The focus will be on studies to optimize the integration of electric vehicles with energy storage systems. In this context, studies can be carried out on using vehicle batteries for transportation and grid-supported energy storage solutions. In this way, the efficiency of renewable energy sources can be increased. It can contribute to the energy system with vehicle-grid integration technology.

Conflict of interest

The author declares that there are no conflicts of interest.

Similarity rate (iThenticate): 13%

References

- [1] IEA, Renewables 2022 Analysis and Forecast to 2027, 2022, Paris, France, December 2022.
- [2] S.S. Martin, A. Chebak, A. El Ouafi, M. Mabrouki, An efficient fuzzy logic based MPPT control strategy for multi-source hybrid power system, 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), pp. 1–8 IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702845>.
- [3] M.A.M. Khan, S. Rehman, F.A. Al-Sulaiman, A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 97, 456–477, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.049>.
- [4] M. Özcan, Increasing voluntary carbon credits potential via renewable energy projects in Turkey, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences 28, 710–719, 2022. <https://doi.org/10.5505/pajes.2022.06882>.
- [5] H. Roh, I. Kim, D. Kim, Ultrathin unified harvesting module capable of generating electrical energy during rainy, windy, and sunny conditions, Nano Energy 70 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104515>.
- [6] X. Wang, A. Palazoglu, N.H. El-Farra, Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems, Appl Energy, 143, 324–335, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.004>.
- [7] V. Gopu, M.S. Nagaraj, Islanded microgrid: hybrid energy resilience optimization, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 35, 693–703, 2024. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v35.i2>.
- [8] M.A.J. Al-Ani, M.A. Zdiri, F. Ben Salem, N. Derbel, Optimized grid-connected hybrid renewable energy power generation: A comprehensive analysis of photovoltaic, wind, and fuel cell systems, Engineering, Technology and Applied Science Research, 14, 13929–13936, 2024. <https://doi.org/10.48084/etasr.6936>.
- [9] Z. Gao, Study on frequency stability control strategies for microgrid based on hybrid renewable energy, Science and Technology for Energy Transition, 2024. <https://doi.org/10.2516/stet/2024047>.
- [10] M.K. Raza, M. Alghassab, A. Altamimi, Z.A. Khan, S.A. Abbas Kazmi, M. Ali, U. Diala, Integration of very small modular reactors and renewable energy resources in the microgrid, Front Energy Res, 12, 2024. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1365735>.
- [11] P. Iliadis, S. Ntomalis, K. Atsonios, A. Nesiadis, N. Nikolopoulos, P. Grammelis, Energy management and techno-economic assessment of a predictive battery storage system applying a load levelling operational strategy in island systems, Int J Energy Res, 45, 2709–2727, 2021. <https://doi.org/10.1002/er.5963>.
- [12] M.F. Elmorshedy, M.R. Elkadeem, K.M. Kotb, I.B.M. Taha, D. Mazzeo, Optimal design and energy management of an isolated fully renewable energy system integrating batteries and supercapacitors, Energy Convers Manag., 245, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114584>.

- [13] S. Sumathi, L.A. Kumar, P. Surekha, Solar PV and wind energy conversion systems: an introduction to theory, modeling with MATLAB/SIMULINK, and the role of soft computing techniques, Springer, Switzerland, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14941-7>
- [14] M. Nadzim, M. Yusoof, M. Iqbal Zakaria, E. Farina Shair, N.S. Khalid, A. Rahman, A.A. Emhemed, Investigating the effectiveness of maximum power point tracking (MPPT) with perturb and observe (P&O) algorithm in solar power battery charging system, *Journal of Engineering Research and Education*, 15, 37-48, 2023. <https://doi.org/10.58915/jere.v15.2023.650>
- [15] W.S.E. Abdellatif, M.A. Amar, N.A. Nouraldin, MPPT achieved of PMSG-based WECS using modified perturb and observant method, 24th International Middle East Power System Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. <https://doi.org/10.1109/MEPCON58725.2023.10462418>.
- [16] A. Belhait, M. Louafi, S. Ghoudelbourk, G. Boukhalfa, A. Milles, Comparative study of three types of MPPT controllers for a wind energy conversion system, 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. <https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576568>.
- [17] A. Kumar Sahu, D. Sharma, A. Mishra, A. Sahu, A comprehensive examination of artificial intelligence-enhanced maximum power point tracking and total harmonic distortion reduction in photovoltaic grids, 2023. <https://ssrn.com/abstract=4678678>.
- [18] N.F. Ibrahim, M.M. Mahmoud, H. Alnami, D.E.M. Wapet, S.A.E.M. Ardjoun, M.I. Mosaad, A.M. Hassan, H. Abdelfattah, A new adaptive MPPT technique using an improved INC algorithm supported by fuzzy self-tuning controller for a grid-linked photovoltaic system, *PLoS One*, 18, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293613>.
- [19] D. Rekioua, K. Kakouche, T. Rekioua, Z. Mokrani, Control a photovoltaic/wind turbine/diesel generator with storage battery, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 21, 416-420, 2023. <https://doi.org/10.24084/repqj21.342>.
- [20] M. Versaci, F. La Foresta, Fuzzy approach for managing renewable energy flows for DC-microgrid with composite PV-WT generators and energy storage system, *Energies (Basel)*, 17, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17020402>.
- [21] S. Sahoo, N.K. Jena, B.K. Sahu, A.K. Naik, Fuzzy based PID controller for frequency control of a power system with renewable energy sources, 5th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology, Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 543-547, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICRTCST61793.2024.10578421>.
- [22] M.B. Prakash, P.R. Sahoo, Analysis of inertia, damping, and synchronization characteristics in grid-connected photovoltaic systems with fuzzy logic control, *IAES International Journal of Robotics and Automation*, 13, 65-79, 2024. <https://doi.org/10.11591/ijra.v13i1.pp65-79>.
- [23] S. Chimplee, S. Khwan-On, Fuzzy controller design for boost converter based on current slope, Proceedings of the 2022 International Electrical Engineering Congress, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. <https://doi.org/10.1109/IEECON53204.2022.9741597>.
- [24] C. Huang, S. Yüksel, H. Dinçer, A novel fuzzy model for knowledge-driven process optimization in renewable energy projects, *Journal of the Knowledge Economy*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02074-w>.
- [25] B.K. Giri, S.K. Roy, Fuzzy-random robust flexible programming on sustainable closed-loop renewable energy supply chain, *Appl Energy*, 363, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123044>.
- [26] C.S. Ganga Bhavani, N. Bhanu Prasad, D. RAVI KISHORE GIET Rajahmundry, Integration of renewable energy sources with intelligent neuro fuzzy control for microgrid system, 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4657531/v1>.
- [27] P. Giri, S. Paul, B.K. Debnath, A fuzzy graph theory and matrix approach (fuzzy GTMA) to select the best renewable energy alternative in India, *Appl Energy*, 358, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122582>.
- [28] N. Singh, B.P. Joshi, S. Gupta, A. Singh, S. Rathee, Renewable-energy-system applications of ambiguous-fuzzy-hybrid-averaging operator, 2nd International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. <https://doi.org/10.1109/ICICACS60521.2024.10498184>.
- [29] G. Jayachitra, H.A. Vidya, S. Reddy H.r, R. Sinha, Fuzzy based perturb & observe MPPT algorithm for grid tied PV system, 2023 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 123-127, 2023. <https://doi.org/10.1109/DISCOVER58830.2023.10316736>.
- [30] K. Ullah, M. Ishaq, F. Tchier, H. Ahmad, Z. Ahmad, Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system, *Results in Engineering*, 20, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101466>.
- [31] G. Bharathi, P. Sai Mahitha, K. Baby Sree, K. Satya Sai Sri, U. Usha Rani, Fuzzy based solar MPPT for electric vehicle application, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.*, 1375, 2024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1375/1/012005>.
- [32] I. Alam, C.S. Sowmya, N. Beemkumar, Fuzzy circuit MPPT for PV installations, 2023 International

- Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 932–935, 2023. <https://doi.org/10.1109/PEEIC59336.2023.10450538>.
- [33] Y. Lamia, M. Cernat, L.G. Pesquer, Comparison between MPPT P&O and MPPT fuzzy controllers for photovoltaic maximum power point tracking, *Journal of Materials and Polymer Science*, 2024. <https://doi.org/10.47485/2832-9384.1044>.
- [34] J. Pande, P. Nasikkar, K. Kotecha, V. Varadarajan, A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy conversion systems, *J Mar Sci Eng.*, 9, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9111187>.
- [35] H.H.H. Mousa, A.R. Youssef, E.E.M. Mohamed, State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 126, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106598>.
- [36] M. Saleh Ebn Sharif, Design, simulation and stability analysis of wind-PV-diesel hybrid power system using ETAP, *American Journal of Modern Energy*, 3,121,2017. <https://doi.org/10.11648/j.ajme.20170306.12>.
- [37] M.A. Abdullah, A.H.M. Yatim, C.W. Tan, R. Saidur, A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3220-3227, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.016>.
- [38] A. Jain, S. Shankar, V. Vanitha, Power generation using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) based variable speed wind energy conversion system (WECS): An overview, *Journal of Green Engineering*, 7, 477-504, 2018. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.742>.
- [39] O. Apata, D.T.O. Oyedokun, An overview of control techniques for wind turbine systems, *Sci Afr.*, 10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00566>.
- [40] A.S. Al-Ezzi, M.N.M. Ansari, Photovoltaic solar cells: a review, *Applied System Innovation* 5 (2022). <https://doi.org/10.3390/asi5040067>.
- [41] G.K. Singh, Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review, *Energy* 53 (2013) 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.057>.
- [42] B. Karaman, S. Taşkın, Development of autonomous photovoltaic panel surface cleaning robot and analyzing of cleaning interval on energy efficiency, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 28, 234-239, 2022. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.45014>.
- [43] Y.B. Koca, Y. Aslan, A. Yonetken, Y. Oguz, Boost converter design and analysis for photovoltaic systems, *Int Con Eng Technol Applied Sci (ICETAS)*, 384-389, 2019.
- [44] A.K. Podder, N.K. Roy, H.R. Pota, MPPT methods for solar PV systems: A critical review based on tracking nature, *IET Renewable Power Generation*, 13, 1615-1632, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5946>.
- [45] K.A. Al Sumarmad, N. Sulaiman, N.I.A. Wahab, H. Hizam, Energy management and voltage control in microgrids using artificial neural networks, PID, and fuzzy logic controllers, *Energies (Basel)* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/en15010303>.
- [46] A.P. Schaffarczyk, Introduction to wind turbine aerodynamics, 3rd ed., Springer Nature, Switzerland AG 2024, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56924-1_1.
- [47] K.I. Usanova, D.S. Rao, S. Pandey, P. Sharma, R. Deorari, A. Vyas, Fuzzy logic-based energy management in sustainable management for renewable integration, *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453708003>.
- [48] M.A. Aneesa Farhan, K. Sasi Reka, A. Raveena Pillay, S. Singh, S. Chowhan, Fuzzy logic based energy management for solar PV-battery DC microgrid, 3rd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. <https://doi.org/10.1109/ICEFEET59656.2023.10452213>.
- [49] H.H. Shakir, F. Ben Salem, Efficient fuzzy logic energy management in stand-alone solar systems, in: 2024 21st International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2024, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 419–424, 2024. <https://doi.org/10.1109/SSD61670.2024.10548799>.





Kamu kurumlarında sıfır atık yönetim sisteminin uygulanması: Su ve kanalizasyon idareleri üzerine bir inceleme

Implementation of zero waste management system in public institutions: A study on water and sewerage administrations

Zehra Özger Koçak¹ , Hüseyin Güven^{2,*} 

^{1,2} İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, Sarıyer, İstanbul Türkiye

Öz

Su ve kanalizasyon idareleri sadece su temini ve atıksu uzaklaştırma değil; aynı zamanda bu amaçla yapılan alt yapı çalışmaları ile bu çalışmalarda oluşan atıkların yönetimini ele alacak bütüncül bir yapıda olmalıdır. Bu çalışmada, sıfır atık yaklaşımı ile ilgili ulusal ve uluslararası mevzuat gözden geçirilmiş ve sıfır atık sisteminin bir su ve kanalizasyon idaresinde uygulanması değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ)'nin atık yönetim sistemi incelenmiş, oluşan atık türleri örnekleriyle verilmiştir. Atık yönetimine ilişkin veriler, İSKİ Atık Yönetimi Birimi tarafından tutulan kayıtlardan elde edilmiştir. 2019 - 2023 yılları arasında kurumda oluşan atık miktarının azalma eğilimi göstermesi ve yeniden kullanım oranının artması söz konusu dönemde İSKİ'de etkin bir atık yönetimi yürütüldüğünü göstermesi açısından önemlidir. Bu durum, kuruma ait sıfır atık yönetim sistemi performansında gelişme kaydedildiğini ortaya koymasından da önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında ele alınan beş yıllık dönem için mevsimlere göre atık miktarları incelenmiş, beş yıllık toplam atık miktarının %17'sinin kış mevsiminde, %33'ünün ise sonbahar mevsiminde olduğu hesaplanmıştır. 2020 yılında ise ağırlıklı olarak Covid-19 salgını nedeniyle oluşan atık miktarı 2019 yılına göre yaklaşık %43 azalmıştır. Yapılan çalışmada ayrıca farklı idari birimlerde oluşan atıkların, geçici depolama alanına taşınma maliyeti hesaplanmıştır. Önemli miktarda atığın İstanbul'un Avrupa Yakası'ndan şehrin Anadolu Yakası'na taşınması sebebiyle Avrupa Yakası'nda yeni bir depolama alanı kurulması önerilmiştir. Bu önerinin uygulanması durumunda atık taşıma maliyetinin %68 düşeceği belirlenmiştir. Sıfır atık yönetim sisteminde hedeflenen verimli kaynak kullanımı açısından bu önerinin başarılı bir uygulama olacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Altyapı çalışmaları, Atık azaltımı, Atık taşıma maliyeti, Kurumsal atık, Sıfır atık

1 Giriş

Dünya genelindeki nüfus artışı, ekonomik büyüme ve tüketim alışkanlıklarındaki değişimler kaynak tüketiminin

Abstract

Water and sewerage administrations should not only manage water supply and wastewater disposal but also handle the management of waste generated by the infrastructure works carried out for this purpose in an integrated manner. In this study, national and international legislation related to the zero waste approach was reviewed and the implementation of the zero waste system in a water and sewerage administration was evaluated. In this context, the waste management system of Istanbul Water and Sewerage Administration (ISKI) was analyzed, with examples provided for the types of waste generated. Data on waste management were obtained from the records maintained by the ISKI Waste Management Unit. The decreasing trend in the amount of waste generated by the institution and the increase in the reuse ratio between 2019 and 2023 are important indicators of the effective implementation of a waste management system at ISKI during this period. This also holds significance in demonstrating improvements in the performance of the institution's zero-waste management system. Waste amounts were analyzed seasonally over the five-year period covered in the study, showing that 17% of the total waste was generated in winter and 33% in autumn. In 2020, the amount of waste generated decreased by approximately 43% compared to 2019, primarily due to the Covid-19 pandemic. In the study, the transportation cost of waste generated in different administrative units to the temporary storage area was also calculated. Since a significant amount of waste was transported from the European Side of Istanbul to the Anatolian Side of the city, it was proposed to establish a new storage area on the European Side. It was determined that implementing this recommendation would reduce the waste transportation cost by 68%. It is thought that this recommendation will be a successful application for achieving efficient resource use, as targeted in the zero waste management system.

Keywords: Infrastructure works, Waste reduction, Waste transportation cost, Institutional waste, Zero waste

dolayısıyla atık miktarının her geçen gün artmasına neden olmaktadır [1]. Atık miktarındaki artışın iyi yönetilememesi hammadde kaynaklarında kayıplara ve çevresel sorunlara

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: guvenhu@itu.edu.tr (H. Güven)

Geliş / Received: 16.06.2024 Kabul / Accepted: 21.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1502066

yol açabilir. Bu durum sürdürülebilir tüketim anlayışı ve etkin bir atık yönetim sisteminin gerekliliğini ortaya koymaktadır [2]. Etkili atık yönetim sistemleri, sürdürülebilirliğe katkıda bulunmanın yanı sıra döngüsel ekonomi ilkelerine uyumlu şekilde uygulandığında, atık miktarını ve atıkların çevresel, sosyal ve ekonomik zararlarını en aza indirmeyi amaçlamaktadır [3,4].

Kurumsal atıklar, ticari işletmeler, okullar, hastaneler veya kamu kurumları gibi çeşitli kuruluşların faaliyetleri sonucu oluşan atıklardır [5]. Bunlar arasında tehlikeli, tehlikesiz ve biyolojik olarak parçalanabilen atıklar bulunur. Kurumsal atık yönetimi; oluşan atıkların etkin bir şekilde toplanması, ayrıştırılması, geri dönüştürülmesi veya güvenli şekilde bertaraf edilmesi için işletme ölçeğinde yapılan planlama ve uygulamaları içerir. Kurumsal atıkların yönetiminde, kurumlarda oluşan atıkların heterojen yapısı, pek çok kurumda atıkların uygun şekilde ayrıştırma, toplama ve bertaraf yöntemlerine yönelik uygulama eksiklikleri, sınırlı mali kaynaklar ve özellikle kamu kurumlarında uygulanacak projelerde devlet desteği ihtiyacı gibi çok yönlü zorluklar bulunmaktadır. Bununla birlikte, kurumların kendi içinde atık yönetim stratejilerini belirleyerek uygulamaya koymaları ile beraber katı atık yönetimine kurumsal düzeyde odaklanmanın avantajlı olduğu belirtilmektedir.

Kentsel altyapı, bir şehir veya yerleşim yerindeki su temini, kanalizasyon, elektrik, doğalgaz, ulaşım ve telekomünikasyon sistemlerinin tümünü kapsamaktadır. Çeşitli kurumlar kentsel altyapı çalışmalarından sorumludur ve bu alanda yapılan inşaat, yenileme ve bakım çalışmaları atık oluşumuna neden olmaktadır. Hem su ve kanalizasyon altyapısı inşaatı ile mevcut altyapının yenilenmesi hem de günlük işletme ve bakım faaliyetleri nedeniyle katı atık oluşturan kurumlar arasında su ve kanalizasyon idareleri de bulunmaktadır. Su ve kanalizasyon idareleri içme suyu temini, atıksu ve yağmur suyu uzaklaştırma hizmetlerini yürütmekle görevli olan kurumlardır. Bir su ve kanalizasyon idaresinde atık oluşumuna neden olan çeşitli faaliyetler bulunmaktadır. Bu faaliyetlerin en başında su ve atıksu arıtma işlemleri, kanalizasyon hizmetleri ve su temini altyapısı çalışmaları gelmektedir. Arıtma tesislerinde gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma süreçleri, kirletici maddeleri uzaklaştırarak çamur oluşumuna neden olur [6]. Diğer yandan altyapı çalışmaları, su ve kanalizasyon hatlarındaki onarımlar veya hat genişletme projeleri sırasında da hasarlı borular, hat üzerinde ekonomik ömrünü tamamlamış donanım ekipmanları gibi atıklar ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar, su ve kanalizasyon sistemlerinin bakımı ve yenilenmesi sürecinde önemli miktarda ve genellikle metal bileşenlerden oluşan geri dönüştürülebilir atık sınıfındadır. Bunların dışında ofisler, atölyeler, laboratuvar, revir ve yemekhanelerden kaynaklanan çeşitli atıklar da oluşmaktadır. Bunlara örnek olarak kağıt, plastik, elektrikli ve elektronik ekipman atıkları, tıbbi atıklar, organik atıklar, bitkisel ve madeni atık yağlar verilebilir. Bir atık üreticisi olarak, su ve kanalizasyon idareleri Atık Yönetimi Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere, oluşturduğu tüm atıkları

çevreye zarar vermeden ve yönetmelik hükümlerine uygun şekilde yönetmekle yükümlüdür [7].

Sıfır atık anlayışı, israfı önleyerek kaynakların etkili ve verimli şekilde kullanılmasını hedeflemektedir. Bu yaklaşım atık oluşumunun önlenmesi, azaltılması, atıkların yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi gibi kavramları içeren sürdürülebilir bir atık yönetimi anlayışına dayanır [8]. Geleneksel atık yönetimi modelinde, ürünlerin satın alındığı, kullanıldığı ve atık olarak uzaklaştırıldığı doğrusal bir ekonomi yaklaşımı bulunmaktadır [9]. Ancak sıfır atık sistemi tarafından desteklenen döngüsel ekonomi anlayışı, bu yaklaşımı değiştirerek atıkları ekonomik sistem içinde tekrar kullanılabilir kaynaklara dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Bu anlayışla, atıklar artık sadece çevresel bir yük değil, aynı zamanda ekonomik bir değere sahip olan yeni bir ürün olarak ele alınmaktadır. Döngüsel ekonomiye geçiş kaynakların etkin bir şekilde kullanılarak israfın ve kaynak kullanımının en aza indirilmesine yönelik stratejileri içerir [10].

Atık yönetimi ve döngüsel ekonomiye geçiş süreçlerinde dünya genelinde çeşitli ulusal ve uluslararası politikalar geliştirilmektedir. Avrupa Birliği (AB), 2018 yılında kabul edilen döngüsel ekonomi paketi ile atık yönetimi mevzuatını revize ederek sıfır atık yaklaşımına yönelik yeni hedefler belirlemiştir. Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan Düzenli Depolama Direktifi'nde; 2035 yılı itibarıyla oluşan toplam atık miktarının en fazla %10'unun düzenli depolama tesislerine gönderilebileceği belirtilmektedir [11]. Atık Çerçeve Direktifinin revizyonu ile belediye katı atıklarının yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi için 2025'e kadar %55, 2030'a kadar %60 ve 2035'e kadar %65'lik hedefler belirlenmiştir [12]. Avrupa Komisyonu; Avrupa'nın döngüsel ekonomiye geçişini teşvik etmek, küresel rekabet gücünü arttırmak ve sürdürülebilir ekonomik büyümeyi desteklemek amacıyla 2015 yılında ilk Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'nı kabul etmiştir [13]. Çeşitli revizyonların ardından, 2020 yılının Mart ayında 'Yeni Döngüsel Ekonomi Eylem Planı' yayımlanmıştır. Bu, Avrupa'nın sürdürülebilir büyümeye yönelik yeni gündemi olan Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın yapı taşlarından biridir [14]. Avrupa Yeşil Mutabakatı, sıfır atık yaklaşımını destekleyen ve 2050 yılına kadar karbon nötr hedefine ulaşmayı amaçlayan bir politika girişimleri paketidir. AB üye devletleri bunu kabul ederek AB'deki net sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar 1990 seviyelerine kıyasla en az %55 oranında azaltmayı taahhüt etmişlerdir [15].

Kentsel katı atık yönetimi ile ilgili hedeflerin yanı sıra bazı ülkelerde kamu sektöründe altyapı işlerinden kaynaklı atıkların azaltılması için de çeşitli hedefler belirlenmiştir. Örneğin; Atık ve Kaynaklar Eylem Programı tarafından yayımlanan kamu hizmeti yüklenici sözleşmesinde İngiltere ve Galler'e yönelik hedefler arasında 2012 yılı itibarıyla düzenli depolama tesislerine gönderilen inşaat, yıkıntı ve hafriyat atıklarının 2005 yılına kıyasla %50 oranında azalması, 2015 yılı itibarıyla inşaat alanlarında atık oluşumunun önlenmesi ve 2020 yılı itibarıyla depolama tesislerine atık gönderilmemesi bulunmaktadır. Bu hedeflerin yanı sıra Kuzey İrlanda için 2020 yılına kadar

inşaat, yıkıntı ve hafriyat atıklarının %75'inin yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi, İskoçya için ise; inşaat ve yıkıntı atıkları da dahil olmak üzere iş atıklarının yılda 200 000 ton azaltılması hedeflenmiştir [16]. Tayvan'da ise sıfır atık hedefine ulaşmak amacıyla hem belediye katı atıkları hem de endüstriyel atıklar için 2005, 2007, 2011 ve 2020 yılları için aşamalı hedefler belirlenmiştir. Nihai hedef; 2020 yılına kadar belediye atıklarında %70 oranında, endüstriyel atıklarda ise %85 oranında atık azaltımı yapılarak geri dönüşüme katkı sağlanmasıdır [17].

Türkiye'de; atıkların oluşumundan bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetiminin sağlanması ile atık oluşumunun ve doğal kaynak kullanımının azaltılması amacıyla 2015 yılında 'Atık Yönetimi Yönetmeliği' yayımlanmıştır. 2019 yılında ise sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda atık yönetimi süreçlerinde çevre ve insan sağlığının ve tüm kaynakların korunması amacıyla 'Sıfır Atık Yönetmeliği' yayımlanmıştır. Bu yönetmelik kapsamında mahalli idareler ile bina ve yerleşkelerin sıfır atık sistemine geçmeleri gereken son tarihler verilmiştir. 2024 yılının Nisan ayında yayımlanan 'Sıfır Atık' konulu Cumhurbaşkanlığı Genelgesi'nde; sıfır atık yönetimine geçilen bina, yerleşke ve mahalli idarelerde, sistemle ilgili eksikliklerin takibinin yapılarak hızla giderilmesi gerektiği ve yükümlülüklerini yerine getirmeyenlere idari yaptırım uygulanacağı belirtilmektedir [18]. Bahse konu idari yaptırım 2020 yılında Çevre Kanunu'nda yapılan değişiklik ile mevzuatta yerini almıştır. Buna göre; sıfır atık yönetim sistemini kurmayan ve/veya kurduğunu belgeleyemeyenlere 20 000 Türk lirası (TL) idari para cezası uygulanacağı bildirilmiştir. 2024 yılı için aynı tutar 96 226 TL olarak güncellenmiştir [19].

Yapılan çalışmada konu edilen su ve kanal idarelerini de içeren kamu kurum ve kuruluşlarının, sıfır atık yönetim sistemine geçişi için son tarih 1 Haziran 2020 olarak belirlenmiştir [20]. Belirlenen tarihe kadar Yönetmeliğin Ek-1 listesinde yer alan bina ve yerleşkelerin, Sıfır Atık Yönetim Sistemi'ni kurarak uygulamaya geçmek, faaliyetlerine ilişkin bilgi ve belgeleri Sıfır Atık Bilgi Sistemi'ne kaydetmek ve Temel Seviye Sıfır Atık Belgesi almakla yükümlü olduğu bildirilmiştir [21].

2560 sayılı İSKİ (İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi) Kanunu ile 1981 yılında kurulan İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi; 24 adet içme suyu arıtma tesisi, 90 adet atıksu arıtma tesisi ile 15 655 000 kişiye hizmet vermektedir [22,23]. Kurumda istihdam edilen toplam personel sayısı ise 9 161'dir [22]. Kurum içinde oluşan tüm atıkların ilgili mevzuat hükümlerine uygun olarak yönetilmesi ile atık yönetimi uygulamalarına ilişkin diğer hususları tespit etmek amacıyla İSKİ Atık Yönetimi Yönergesi 27.11.2018 tarihinde yürürlüğe konulmuştur. Ayrıca İSKİ'nin 2023 – 2026 yıllarını kapsayacak şekilde üç yıllık 'Endüstriyel Atık Yönetim Planı' hazırlanmıştır.

2017 yılında "Sıfır Atık Projesi"nin ilan edilmesiyle birlikte; kurum içinde sıfır atık yönetim sistemi kurma çalışmaları başlamıştır. Sıfır Atık Yönetim Sistemi'ne

ilişkin ilke ve esasların belirlendiği Sıfır Atık Yönetmeliği'nin 12 Temmuz 2019 yılında yayımlanmasıyla; atığın kaynağında ayrıştırılması ve 'Sıfır Atık Projesi' farkındalığının oluşumu için geri dönüşüm ünite ve kutuları ile plastik, polietilen atık toplama kapları temin edilerek kurum içinde tüm birimlere dağıtılmıştır. İSKİ Atık Yönetimi Yönergesi gereği ve Sıfır Atık Projesi kapsamında, atık değerlendirme kültürünün kurumda yaygınlaştırılması amacıyla, tüm personele her yıl 'Atık Yönetimi ve Sıfır Atık' konulu eğitim verilmektedir. İSKİ'nin orta ve uzun vadeli amaçlarını ve geleceğe yönelik hedeflerini içeren 2021 – 2025 Stratejik Planı'nda; 7 adet Stratejik Amaç, 28 adet Stratejik Hedef, 128 adet faaliyet ve 97 adet Performans Göstergesi belirlenmiştir [24]. Belirlenen stratejik amaçlardan biri de iklim değişikliği etkilerini dikkate alarak çevreye sürdürülebilir katkı sağlamaktır. Bu amaçla hedeflenen; kurum içinde atık yönetim sistemini etkinleştirmek ve sürdürülebilirliğini sağlamaktır. Bu kapsamda 2024 ve 2025 yılları için atıkların geri kazanım oranı ve sıfır atık sistemi kurulmasının kurum içindeki iş planına uyum oranı performans göstergeleri olarak seçilmiştir. Stratejik Plan kapsamındaki veriler üçer aylık dönemlerde izlenerek sonuçlar takip edilmektedir. Kurumun stratejik planı doğrultusunda belirlenen performans hedef ve göstergelerinin ölçülmesini sağlayan ve idare bütçesi ile faaliyet raporunun hazırlanmasına dayanak oluşturan 2024 yılı Performans Programı oluşturulmuştur. Bu kapsamda; 2024 yılı için atık geri kazanım oranı hedefi %95, sıfır atık sistemi kurulmasının iş planına uyum oranı hedefi %100 olarak belirlenmiştir [25].

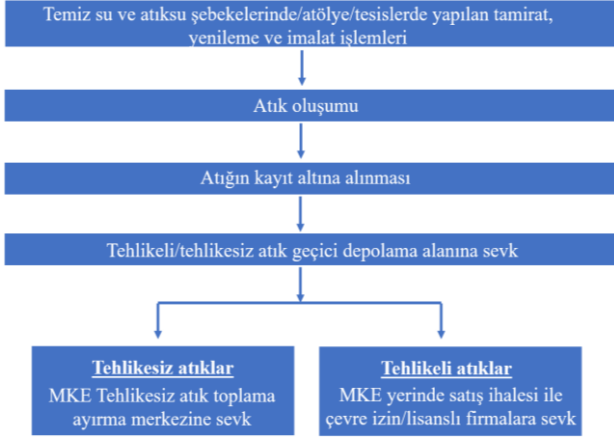
Bu çalışmanın temel amacı, kurumsal atık yönetimi kapsamında sıfır atık yönetim sisteminin bir kamu kurumunda uygulanmasının etkilerini incelemektir. Bu amaçla, kamu kurumlarından olan su ve kanalizasyon idarelerindeki atık yönetimi değerlendirilmiş ve İSKİ'de 2019 - 2023 yılları arasında oluşan atık türleri, atık miktarları ve bu miktarların yıllara göre değişimini etkileyen unsurlar sıfır atık stratejisi kapsamında incelenmiştir. Çalışma kapsamına; yeterli veri olmaması sebebiyle ofis atıkları ile arıtma çamurlarının ilgili mevzuatta belirtilen şartlarda muhafaza edilmesi, geri kazanımı ve bertarafı ile ilgili tüm işlemlerin çamuru üreten birim tarafından yapılması ve olduğu yerde yönetilmesinin daha ekonomik olması nedeniyle arıtma çamurları dahil edilmemiştir. Atık oluşumunun yanı sıra, tehlikeli ve tehlikesiz atıkların ayrı olarak depolandığı geçici depolama alanı hakkında bilgiler verilerek atıkların olduğu yerden geçici depolama alanına taşınmasına ait maliyet hesaplaması yapılmıştır. Taşıma maliyetlerinin gelecek yıllarda enflasyon etkisiyle artacağı göz önünde bulundurularak sıfır atık yaklaşımı doğrultusunda çözüm önerileri geliştirilmiştir. Yapılan çalışma, değerlendirilen su ve kanalizasyon idaresinde etkin bir atık yönetim sistemi kurulması ile kurum içinde oluşan atık miktarının azaltılması, yeniden kullanım oranının artması ve atık taşıma maliyetlerinin azaltılması açısından önemlidir. Ayrıca bu çalışmanın, hem kamu kurumu olarak su ve kanalizasyon idarelerine odaklanması hem de altyapı

çalışmalarından kaynaklanan atıkların yönetimini ele alması yönüyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma kapsamında ele alınan kurumdaki atık yönetimi

İSKİ dahilinde çeşitli faaliyetler sonucu oluşan ve geçici depolama alanına sevk edilen atıkların izledikleri yolu gösteren atık akım şeması Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. İSKİ dahilinde oluşan atıkların yönetimine ait akım şeması

MKE: Makine ve Kimya Endüstrisi Anonim Şirketi

Kurum içinde temiz su ile atıksu şebekelerinde, atölyelerde ve İSKİ'ye ait arıtma tesisleri, sosyal tesisler ve şube müdürlüklerinde yapılan tamirat ve yenileme işlemleri sonucunda çeşitli türde atıklar oluşmaktadır. Bu atıklar kayıt altına alınıp kuruma ait araçlarla geçici depolama alanına sevk edilerek tehlike durumlarına göre depolanmaktadır. Son aşamada Atık Yönetimi Birimi tarafından tehlikesiz atıkların MKE tehlikesiz atık toplama ayırma merkezine, tehlikeli atıkların ise MKE yerinde satış ihalesiyle çevre izin/lisanslı firmalara sevk edilmesi sağlanmaktadır.

2.1.1 Atık oluşumu

İSKİ farklı türde atıkların oluştuğu çeşitli faaliyetlerde bulunmaktadır. Oluşan atıkların büyük bölümü su temini ve kanalizasyon hizmetleri esnasındaki hat yenileme, genişletme ve deplase çalışmalarından kaynaklanmaktadır. Bu atıklar, büyük oranda tehlikesiz atık niteliğindedir. Kurum içinde atık oluşumuna neden olabilecek faaliyet alanları ve çeşitleri atık örnekleri ile birlikte Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmektedir.

Malzemelerin kullanım ömrünün tamamlandığına ve atık haline geldiğine, atık üreten birim tarafından karar verilir ve bu karara ilişkin onay evrakları atık oluşturan birimin harcama yetkilisi ve/veya ilgili Genel Müdür Yardımcısı tarafından imza altına alınır. Atıkların oluşumundan ve yönetiminden sorumlu olan birimler, atıkların ayrılması, toplanması, taşınması, geri kazanılması ve bertarafı sırasında; çevre ve insan sağlığını olumsuz etkilemeyecek usul ve işlemleri uygulamaktadırlar. Kurum

çinde atık oluşturan birimlerde; oluşan atıklardan sorumlu olmak üzere, her bir Müdürlük ve/veya birim için en az bir asıl ve bir yedek olmak üzere birim atık sorumluları belirlenmiştir. Birim atık sorumluları, birimlerinde oluşan atıkların sızdırmaz ve emniyetli konteyner, bidon ve benzeri kaplar içerisinde veya geçirimsizliği sağlanmış tesis içi biriktirme alanlarında birbirlerinden ayrı olarak toplanması, muhafaza edilmesi, tasnif edilmesi işlemlerinin yapılmasını sağlar. Kurum bünyesinde oluşan tüm atıkların, birim atık sorumluları tarafından

Tablo 1. İSKİ'nin tehlikesiz atık oluşumuna sebep olan başlıca faaliyetleri

Faaliyet Alanları	Faaliyet/İşlem	Tehlikesiz Atıklar
İdari Büro/Ofisler	Koltuk, masa ve dolapların kullanım dışı kalması	Ahşap, demir, plastik masa-dolap-koltuk-sandalye, karışık ambalaj atıkları
Atölyeler	Kesme, yüzey pürüzsüzleştirme işlemi	Metal hurdalar/metal tozu, karışık cinsten ahşap, demir çelik, plastik, alüminyum malzemeler, kablolar
Kanal hizmetleri	Kanal bakım ve onarım işlemleri	Demir-çelik boru ve bağlantılar
Tesislerin bakım ve onarımı	Binalarda kapı/pencere değişimleri, tadilat işlemleri	Metal hurdalar/metal tozu, karışık cinsten ahşap, demir çelik, plastik, alüminyum malzemeler, kablolar
Saha çalışmaları	Bakım, yenileme ve onarım işlemleri	Eski borular, metal parçalar, bakır, bronz, pirinç malzemeler, kurşun, alüminyum vb.

Tablo 2. İSKİ'nin tehlikeli atık oluşumuna sebep olan başlıca faaliyetleri

Faaliyet Alanları	Faaliyet/İşlem	Tehlikeli Atıklar
İdari Büro/Ofisler	Fotokopi, faks, yazıcı kullanılmasıyla oluşan atıklar, aydınlatmadan kaynaklı atıklar, pilli cihazların kullanımı	Toner-kartuş atıkları, atık floresan, nikel kadmiyum piller, elektrikli ve elektronik ekipman atıkları
Atölyeler	İmalat, bakım onarım işleri	Kontamine atık (bez, üstübü, eldiven, iş elbisesi), kontamine ambalaj, atık boya, kontamine metal, atık tüpler, organik çözücüler
Laboratuvar	Laboratuvar analiz işlemleri	Kontamine olmuş analiz kapları, tarihi geçmiş kimyasallar
Sağlık ünitesi	Sağlık hizmetleri	Tıbbi atıklar, tarihi geçmiş ilaç ve kimyasallar
Saha ve tesislerde yapılan çalışmalar	Bakım, yenileme ve tamir işlemleri	Trafo, pompa, yağlı ve elektrikli malzemeler, organik çözücüler
Yemekhane	Kızartma, pişirme işlemleri	Bitkisel atık yağlar
Araç tamir/bakım	Tamir ve bakım işleri	Atık akümülatör, madeni atık yağlar

Atık Yönetim ve Takip Sistemi'ne atık kodları kullanılarak girişi yapılmaktadır. Atık Yönetim ve Takip Sistemi, depolama alanına nakledilecek atıkların türlerini, miktarlarını ve hangi faaliyet sonucu olduklarını kayıt altına almayı sağlamaktadır. Kayıt altına alınmamış hiçbir atık, geçici depolama alanına kabul edilmemektedir. Geçici Depolama Alanına Atık Teslim Formu ile atıkların geçici depolama alanına kabulü yapılmaktadır.

2.1.2 Atıkların geçici depolama alanına transferi

Kurum bünyesinde oluşan atıkların büyük çoğunluğu tehlikesiz atık niteliğindedir. Tehlikesiz atıklar büyük oranda boru, pompa, vana vb. hacimli malzemeler olması sebebiyle oluştuğu alanda geçici olarak depolanması mümkün değildir. Bu malzemeler kuruma ait araçlarla Paşaköy Tehlikesiz Atık Geçici Depolama Alanı'na nakledilmekte ve burada zemini geçirimsiz hale getirilmiş alanlarda geçici süreyle depolanmaktadır. 20.03.1971 tarih ve 7/2156 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile 19.03.2001 tarihli B.02.0.PPG.0.12.320-4421 sayı, 2001/15 sıra numaralı Başbakanlık Genelgesi gereğince, İSKİ'de oluşan tehlikesiz atıkların satışı MKE A.Ş.'ye yapılmaktadır [26, 27]. Tehlikeli atıklar ise; atıkların oluştuğu tesislerin sınırları içerisinde uygun bir yer bulunmadığı için kapalı ve zemini geçirimsiz hale getirilerek bu atıkların güvenli bir şekilde geçici olarak depolanmasına uygun hale getirilen Paşaköy Tehlikeli Atık Geçici Depolama Alanı'nda depolanmaktadır. Tehlikeli atıkların, MKE A.Ş. tarafından yerinde satış ihalesi yöntemiyle çevre izin/lisanslı firmalara satışı yapılmaktadır.

2.1.3 Paşaköy atık geçici depolama alanı

Paşaköy İstanbul'un Sancaktepe ilçesine bağlı bir mahalledir. Depolama alanı İSKİ Paşaköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi ile aynı saha içinde yer almaktadır. Geçici depolama alanında tehlikeli atıklar için kapalı, tehlikesiz atıklar için açık depolama alanı bulunmaktadır. Tehlikeli atıklar 2 500 m²'lik kapalı alan içinde atık türüne uygun olarak tasarlanmış ayrı bölmelerde, uluslararası standartlara uygun toplama kaplarında depolanmaktadır. Depolama alanında olası sızma veya dökülmelere karşı absorban malzeme bulundurulmaktadır. Tehlikeli atık depolama alanında meydana gelebilecek dökülmelere karşı kör kanal ve kör kuyu bulunmaktadır. Tehlikesiz atıklar ise 5 500 m²'lik açık alanda depolanmaktadır. Geçici depolama alanının etrafı olası sızma ve dökülmelere karşı izgarayla çevrelenmiş olup; izgarada biriken sıvılar toplanarak uygun yöntemle geri kazanımı sağlanmakta veya arıtıldıktan sonra alıcı ortama deşarj edilmektedir. Yangın gibi her türlü acil duruma karşı güvenlik tedbirleri alınmıştır. Depolama alanında atıkların tehlikelilik özelliklerine göre uygun bölümlendirme yapılmış olup atık kodlarına uygun şartlarda ayrı şekilde depolanmaktadır. Ayrıca geçici depolama alanından sorumlu bir personel belirlenmiş olup alana izinsiz giriş ve çıkışlara müsaade edilmemektedir. Açık ve kapalı depolama alanına ait uydu görüntüsü Şekil 2'de kırmızı çizgiler ile çevrelenmiş olarak verilmektedir



Şekil 2. Paşaköy Atık Geçici Depolama Alanı (kırmızıyla çevrili) uydu görüntüsü (beyaz bölge tehlikeli atık, diğer bölge tehlikesiz atık depolama alanına göstermektedir).

Geçici depolama alanında kullanım dışı kalmış malzemelerin/atıkların tekrar kullanıma kazandırılması için Gri Bölge adı verilen alan oluşturulmuştur. Tekrar kullanılabilirliği olan malzeme/atık bu alana alınmaktadır. Vakum ve basınç pompası, ahşap masa, sandalye ve dolap gibi yeniden kullanılabilir durumda olan malzemeler ihtiyaca göre İSKİ bünyesindeki birimlere veya çeşitli kamu kurumlarına (okul, belediye vb.) verilerek sıfır atık yönetim sistemi kapsamında yeniden kullanıma kazandırılmaktadır. Depolama alanından çıkışı yapılacak ve tekrar kullanılabilirliği olan malzemeler için Geçici Depolama Alanından Atık Çıkış Formu oluşturularak kurum içine, çeşitli kamu kurumlarına veya çevre izin/lisanslı tesislere malzemelerin gönderilmesi sağlanmaktadır.

2.2 İSKİ'de oluşan atık türleri ve miktarları

2.2.1 Atık türleri

Kurum içinde oluşan atıklar; Atık Yönetimi Yönetmeliği'nin Ek - 4 listesinde yayımlanan atık kodu ve tanımlarına uygun şekilde, İSKİ Atık Yönetimi Birimi tarafından yıl boyunca kayıt altına alınmaktadır. İSKİ bünyesinde oluşan ve bu çalışma kapsamına giren atık türlerinin tamamı Tablo 3'te verilmektedir.

Kurum içinde oluşan bitkisel ve madeni atık yağların ihale yoluyla lisanslı firmalara satışı yapılmaktadır. Lisanslı firmalar oluştuğu yerden bu yağları teslim almaktadır. Kurum bünyesinde çeşitli ilçelerde personele yönelik sağlık hizmeti verilmektedir. Bu hizmetler sonucu oluşan tıbbi atıklar, Bakanlık sistemi üzerinden çevrimiçi talep yapılarak Büyükşehir Belediyesi'nin toplama araçlarına iletilmektedir.

Tablo 3. İSKİ’de oluşan atık türleri

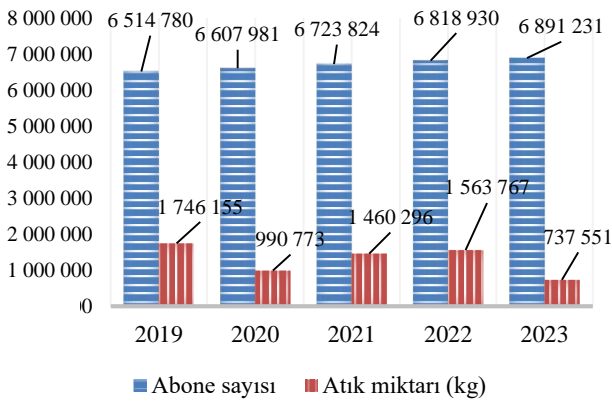
Bölüm Kodu	Atık Kodu	Atık Kodu Tanımı	Açıklama
08		Astarlar (Boyalarda, Vernikler ve Vitriifiye Emayeler), Yapışkanlar, Macunlar ve Baskı Mürekkeplerinin Üretim, Formülasyon, Tedarik ve Kullanımından (İFTK) Kaynaklanan Atıklar	
08 01		Boya ve Verniğin İmalat, Formülasyon, Tedarik ve Kullanımından (İFTK) ve Sökülmesinden Kaynaklanan Atıklar	
08 03	08 01 11*	Organik çözücüler ya da diğer tehlikeli maddeler içeren atık boya ve vernikler	M
	08 03 17*	Baskı Mürekkeplerinin İmalat, Formülasyon, Tedarik ve Kullanımından (İFTK) Kaynaklanan Atıklar Tehlikeli maddeler içeren atık baskı tonerleri	M
10		Isıl İşlemlerden Kaynaklanan Atıklar	
10 11	10 11 03	Cam ve Cam Ürünleri Üretim Atıkları Cam elyaf atıkları	
13		Yağ Atıkları ve Sıvı Yakıt Atıkları (Yenilebilir Yağlar, 05 ve 12 Hariç)	
13 02	13 02 08*	Atık Motor, Şanzıman ve Yağlama Yağları Diğer motor, şanzıman ve yağlama yağları	A
15		Atık Ambalajlar ile Başka Bir Şekilde Belirtilmemiş Emiciler, Silme Bezleri, Filtre Malzemeleri ve Koruyucu Giysiler	
15 01	15 01 11*	Ambalaj (Belediyenin Ayrı Toplanmış Ambalaj Atıkları Dahil) Boş basınçlı konteynerler dahil olmak üzere tehlikeli gözenekli katı yapı (örneğin; asbest) içeren metalik ambalajlar	A
16		Listede Başka Bir Şekilde Belirtilmemiş Atıklar	
16 01	16 01 03	Çeşitli Taşıma Türlerindeki (İş Makineleri Dahil) Ömrünü Tamamlamış Araçlar ve Ömrünü Tamamlamış Araçların Sökülmesi ile Araç Bakımından (13, 14, 16 06 ve 16 08 hariç) Kaynaklanan Atıklar Ömrünü tamamlamış lastikler	
16 02	16 02 15*	Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları İskarta ekipmanlardan çıkartılmış tehlikeli parçalar	A
16 06	16 06 01*	Piller ve Akümülatörler Kuruşunlu piller ve akümülatörler	A
17		İnşaat ve Yıkım Atıkları (Kirlenmiş Alanlardan Çıkarılan Hafriyat Dahil)	
17 01	17 01 01	Beton, Tuğla, Kiremit ve Seramik Beton	
17 02	17 02 01 17 02 03	Ahşap, Cam ve Plastik Ahşap Plastik	
17 04	17 04 01 17 04 02 17 04 03 17 04 05 17 04 09* 17 04 11	Metaller (Alaşımaları Dahil) Bakır, bronz, pirinç Alüminyum Kurşun Demir ve çelik Tehlikeli maddelerle kontamine olmuş metal atıkları 17 04 10 dışındaki kablolar	M
18		İnsan ve Hayvan Sağlığı ve/veya Bu Konulardaki Araştırmalardan Kaynaklanan Atıklar (Doğrudan Sağlığa İlişkin Olmayan Mutfak ve Restoran Atıkları Hariç)	
18 01	18 01 03* 18 01 08*	İnsanlarda Doğum, Teşhis, Tedavi ya da Hastalık Önleme Çalışmalarından Kaynaklanan Atıklar Enfeksiyonu önlemek amacı ile toplanmaları ve bertarafı özel işleme tabi olan atıklar Sitotoksik ve sitostatik ilaçlar	A A
20		Ayrı Toplanmış Fraksiyonlar Dahil Belediye Atıkları (Evlerden Kaynaklanan ve Benzer Ticari, Endüstriyel ve Kurumsal Atıklar)	
20 01	20 01 11 20 01 21* 20 01 26* 20 01 33* 20 01 35*	Ayrı Toplanan Fraksiyonlar (15 01 Hariç) Tekstil ürünleri Flüoresan lambalar ve diğer cıva içeren atıklar 20 01 25 dışındaki sıvı ve katı yağlar 16 06 01, 16 06 02 veya 16 06 03 'ün altında geçen pil ve akümülatörler ve bu pilleri içeren sınıflandırılmamış karışık pil ve akümülatörler 20 01 21 ve 20 01 23 dışındaki tehlikeli parçalar içeren ve iskartaya çıkmış elektrikli ve elektronik ekipmanlar	A A A A
20 02	20 02 01	Bahçe ve Park Atıkları (Mezarlık Atıkları Dahil) Biyolojik olarak bozunabilir atıklar	
20 03	20 03 07	Diğer Belediye Atıkları Hacimli atıklar	

Atık kodunun yanında bulunan yıldız (*) işareti atığın tehlikeli olduğunu ifade etmektedir. “Açıklama” sütununda yer alan (A) işareti atığın kesin tehlikeli; (M) işareti atığın muhtemel tehlikeli olduğunu belirtir.

Çeşitli analizlerin yapıldığı temiz su ve atıksu laboratuvarlarından kaynaklanan tehlikeli atıklar, yapılan sözleşme ile Bakanlık sistemi üzerinden çevrimiçi talep yapılarak İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İSTAÇ)'ye verilmektedir. Atık piller her birim bünyesinde bulunan pil kutularında diğer atıklardan ayrı olarak biriktirilmekte ve yetkilendirilmiş kuruluş olan Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği (TAP)'ne teslim edilmektedir. Yemekhanelerde oluşan biyobozunur atıklar ise İSTAÇ'a teslim edilerek kompostlaştırılması sağlanmaktadır. Dolayısıyla kurum içinde oluşan ve bu atıklar dışında kalan tüm atıklar, geçici depolama alanına nakledilerek burada geçici olarak depolanmaktadır.

2.2.2 Atık oluşum miktarları

Atık Yönetimi Birimi tarafından her yıl için, depolama alanına giriş yapan atıkların; atık kodunu, miktarını, depolama alanına getirildiği tarihi, taşıma sırasında kullanılan kamyon sayılarını ve atığı oluşturan birim adını içeren tablolar halinde kayıt tutulmaktadır. 2019 – 2023 yılları arasında İSKİ'nin hizmet verdiği abone sayısı ve İSKİ'de oluşan yıllık atık miktarı Şekil 3'te gösterilmektedir. Bahse konu miktarlar, kurum içinde oluşan atık türlerinin tamamı dahil edilerek hesaplanmıştır. Abone sayısına göre yıllar içinde oluşan atık miktarı değişimini incelemek amacıyla kg cinsinden atık oluşum miktarları abone sayısına bölünmüş ve bu değerler performans göstergesi (indikatörü) olarak değerlendirilebileceği öngörülmüştür. Hesaplanan değerler; 2019 yılında 0.27 kg/abone, 2020 yılında 0.15 kg/abone, 2021 yılında 0.22 kg/abone, 2022 yılında 0.23 kg/abone ve 2023 yılında 0.11 kg/abone olarak bulunmuştur.



Şekil 3. İSKİ abone sayısı ve atık miktarı değişimi

2019- 2023 yılları arasında İSKİ Genel Müdürlüğü tarafından sunulan su ve atıksu hizmetlerinden abonelik sözleşmesi çerçevesinde faydalanan abone sayısı düzenli bir şekilde artış göstermiştir. Buna karşın oluşan atık miktarında dalgalanmalar söz konusudur. Abone başına hesaplanmış olan değerler de bu dalgalanmayı göstermektedir. Bu durumun sebebi; kullanılan farklı türde malzemelerin ekonomik ömrünün atık haline gelmeden önce kullanıldıkları yere, maruz kaldığı koşullara ve bakım

süreçlerine göre değişiklik göstermesi olarak verilebilir. Bununla birlikte, 2019 senesi ile mukayese edildiğinde zaman zaman artış göstermesine rağmen abone başına oluşan atık miktarlarının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.

2.2.3 Atık taşıma maliyeti

İSKİ'de oluşan atıkların büyük bir çoğunluğu olduğu yerden Paşaköy Atık Geçi Depolama Alanı'na taşınmaktadır. Bu taşımanın İSKİ'ye maliyetini hesaplamak amacıyla 2019-2023 yılları arasında geçici depolama alanına atık getiren birimlerin yıl bazında incelemesi yapılmıştır. Atık getiren her birime ait atık taşıyan kamyon sayısı, atıkların olduğu yerden geçici depolama alanına taşıma mesafesi, harcanan akaryakıt ve köprü/otoyol ücretleri hesaba katılarak atık getiren kamyonlar için toplam taşıma maliyeti hesaplanmıştır. Atık taşıyan kamyonlar dışında, atık oluşturan birime ait birim atık sorumlusunun da depolama alanında bulunarak oluşturduğu atıklara nezaret etmesi ve teslim ettiği atıklara ait evrakları imzalaması gerekmektedir. Bu sebeple birim atık sorumlusunun depolama alanına gelirken kullandığı araçların ulaşımı için de benzer parametreler hesaba katılarak maliyet hesaplanmıştır. Son olarak Genel Müdürlükte bulunan Atık Yönetimi Birimi'nin geçici depolama alanına ulaşımı için de maliyet hesaplanarak 2019 ve 2023 yılları için toplam maliyet belirlenmiştir. Birim atık sorumluları ile Atık Yönetimi Birimi'ndeki personelin ulaşımının binek araçlarla gerçekleştirildiği dikkate alınmıştır.

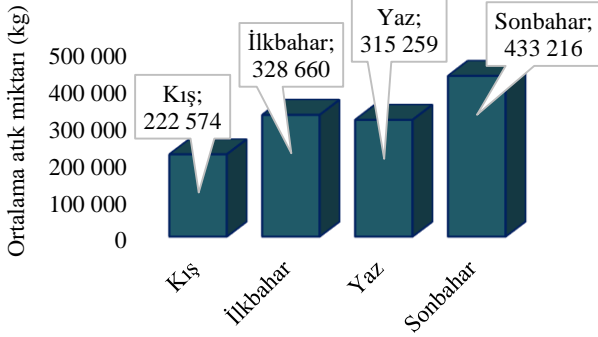
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Atık oluşumuna etki eden unsurlar ve sıfır atık sisteminin atık oluşumuna etkisi

Yapılan çalışma kapsamında 2019 – 2023 yılları arasında kurum içinde oluşan atık miktarları incelenmiş ve oluşan atık miktarlarındaki değişime etki eden unsurlar ele alınmıştır. 2020 yılında İSKİ'de oluşan atık miktarı, 2019 yılında oluşan atık miktarına göre yaklaşık %43 oranında azalmıştır. Bu durumun, Covid-19 salgını nedeniyle dönüşümlü ve esnek çalışma uygulamaları ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, Fan vd.'nin [28] yaptığı çalışmada; Covid-19'un atık yönetimi üzerindeki etkisi araştırılmış, Çekya'da kurumsal ve endüstriyel atık oluşum miktarında %40 düşüş gözlemlenmiştir. Sharma vd. [29] tarafından yapılan başka bir çalışmada, Covid-19 küresel salgını sırasında ekonomik faaliyetlerin geçici olarak durması nedeniyle ticari ve endüstriyel sektörlerdeki atık oluşumunda azalma gözlemlendiği ve New York şehrinde bu sektörlerdeki atık oluşum miktarında %50'ye kadar bir düşüş görüldüğü belirtilmiştir. Jayasinghe vd.'nin [30] çalışmasında ise; Tokyo'da Covid-19 salgını sırasında işyerlerinin kapanması ve sokağa çıkma kısıtlamaları nedeniyle endüstriyel, ticari ve kurumsal atık oluşumunda %57'lik bir düşüş gözlemlendiği belirtilmiştir.

2019 – 2023 yılları arasında İSKİ'de mevsimlere göre atık oluşumunun dağılımı incelenmiştir (Şekil 4). Buna göre oluşan atık miktarının kış mevsiminde en az, sonbaharda ise en fazla olduğu görülmektedir. Kış mevsimi için son beş

yılda oluşan atık miktarları toplandığında toplam atık miktarının %17'si olduğu görülmüştür. Sonbahar mevsimi için aynı değerin toplam atık miktarının %33'ünü oluşturduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4. 2019-2023 yılı toplam atık miktarlarının mevsimlere göre dağılımı

Kış aylarında mevsim şartlarından ötürü saha çalışmaları yürütmenin zor olmasının, atık miktarının bu mevsimde en az oranda çıkmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Yapılması planlanan çalışmaların sonbahar mevsimi içinde tamamlanarak kış mevsimi başlamadan bitirilmesi saha çalışmaları açısından kolaylık sağlamaktadır. Bu anlayışın, su ve kanalizasyon altyapısının bakım ve onarımı ile arıtma tesislerindeki çalışmaların sonbahar mevsiminde yoğunlaşmasına ve bu durumun ise sonbaharda daha fazla atık oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

İSKİ tarafından isale hattı inşaatları ilgili altyapı yönetmelikleri çerçevesinde İstanbul'daki don derinliği dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Fakat altyapıda toprak koşulları, yeraltı engelleri ve çevresel faktörler gibi zorluklar nedeniyle gerekli yönetmelik şartlarını sağlamak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu durum altyapı bileşenlerini hava koşulları etkisine daha açık hale getirmektedir. İstanbul'da içme suyu temininde kullanılan çelik borularda mevsim geçişlerinde boruların genleşmesi veya büzülmesi kaynak noktalarında nadir de olsa çatlaklara sebebiyet vermektedir. Çatlamış boruya ilk müdahale onarımının yapılmasıdır. Fakat zamanla başka koşulların da etkisiyle işlevini yitiren boruların yeni borular ile değiştirilmesi gerekebilmektedir. Bu durumun da atık oluşumu üzerinde bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Literatürde konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde; Piegoń vd. [31] tarafından Polonya'da yapılan çalışmada, Rzeszów şehrinde su şebekesindeki arıza oranlarının mevsimlere göre değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak, arıza sayılarında sonbahar ve kış aylarında yüksek değerler; ilkbahar ve yaz aylarında daha düşük değerler gözlemlenmiştir. Młyński vd.'nin [32] yaptığı çalışmada; Polonya'nın Nowy Sącz şehrinde bulunan bir su şebekesinde arızalara neden olan faktörler arasında yıl içinde değişen hava koşulları gösterilmiş ve şebekede 2007 – 2017 yılları arasında meydana gelen arıza sayıları mevsimsellik açısından istatistiksel yaklaşımlarla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yılın belirli bir

döneminin su hatlarında arıza meydana gelmesi üzerindeki etkisini net bir şekilde belirlemenin zor olduğu ancak ilkbahar ve yaz aylarında sonbahar ve kış aylarına göre daha sorunsuz çalışmasının beklenebileceği ortaya çıkarılmıştır. Rezaei vd. [33] tarafından yapılan çalışmada ise, Birleşik Krallık'ta bir su idaresinde meydana gelen hat arızaları analiz edilmiş ve boru hasarları ile bu hasarlara etki ettiği düşünülen faktörler arasındaki ilişki tartışılmıştır. Gerçekleştirilmiş olan analizlerde 10 yıllık dönem boyunca demir, plastik, beton veya çelik malzemelerden oluşan su borularının patlama sayılarının kayıtları tutulmuş, 78 000 arıza kaydı tespit edilmiştir. Buna göre sonbahar ve kış aylarında patlama sayısının tüm patlama miktarının %60'ını, ilkbahar ve yaz aylarında ise %40'ını oluşturduğu görülmüştür. Bu durum hava sıcaklığının, su şebekesi arızalarında baskın bir faktör olmasa da önemli bir faktör olduğunu göstermiştir.

İSKİ'de son beş yılda abone sayısı her yıl artış göstermesine rağmen oluşan atık miktarlarına bakıldığında azalma eğilimi gösterdiği söylenebilir (Şekil 3). Ele alınan dönemde zaman zaman dalgalanmalar görülmekle beraber, 2023 yılındaki atık oluşumunun, sıfır atık yönetim sisteminin kurum içinde yeni kurulmaya başlandığı 2019 yılına kıyasla yaklaşık %58 oranında azaldığı görülmüştür. Bu azalmada, kurum içinde sıfır atık sisteminin kurulmasının yanı sıra yapılan eğitim ve bilinçlendirme çalışmalarının etkili olduğu söylenebilir. Ayrıca bu azalma eğilimi, sıfır atık yönetim sistemi performansında gelişme kaydedildiğini göstermesi açısından önemlidir. Su temini ve kanalizasyon hizmetleri yürütülürken kullanılan malzemeler genellikle kullanımları süresince aşınabilmekte ve teknik özelliklerini kaybedebilmektedir. Su dağıtım sistemlerinin işlevini tam olarak yerine getirememesine yol açan çeşitli fiziksel, çevresel ve işletmeye bağlı faktörler bulunmaktadır. Bunlar arasında; boru malzemesi, yaşı, çapı ve uğradığı korozyon ile şebekedeki işletme basıncı, dağıtılan debi, zemin tipi ve bölgedeki sismik aktiviteler sayılabilir [34]. Şebekelerde kullanılan ekipmanların yıpranması, zaman içinde performanslarının düşmesine, arızalara neden olmasına veya enerji verimliliğinin azalmasına yol açabilir [35]. Böyle bir durumda, kurum içinde uygulanan sıfır atık yönetim sistemi doğrultusunda, ilk adım olarak tamir edilebilecek durumda olan ekipmanların tamir edilerek kullanıma devam edilmesi tercih edilmektedir. Tamir edilemeyecek durumda olanların ise; daha modern ve verimli ekipmanlarla değiştirilmeleri ve yeni teknolojilerin kullanılması daha avantajlı hale gelmektedir. Su şebekelerinin kademeli olarak modernize edilmesinin, arıza oranlarını azaltmanın yanı sıra su dağıtımının güvenilirliğini ve dolayısıyla su tüketicilerinin memnuniyetini artırdığı söylenebilir [31]. İşlevselliğini yitiren malzemeler ise, hurda olarak ayrılarak geri dönüşüme katkı sağlanmaktadır.

Literatürde sıfır atık yaklaşımının benimsenmesiyle atık miktarının azalmasına ilişkin çeşitli örnekler bulunmaktadır. Young vd.'nin [17] yaptığı çalışmada, Tayvan'da endüstriyel atıklarda sıfır atık hedefine ulaşmak amacıyla çeşitli stratejiler kabul edilmiş ve gelecek planları gözden geçirilmiştir. Bu stratejiler arasında, atık geri

dönüşüm programının oluşturulması, temiz üretimin teşvik edilmesi, yeşil satın alma programı ve kamuoyu bilincinin oluşturulması sayılabilir. 2000 yılında Tayvan'da üretilen endüstriyel atıkların %59'u geri dönüştürülerek yeniden kullanılmıştır. 2003 yılında sıfır atık politikası uygulamaya konulmuş ve 2006 yılının sonunda endüstriyel atıklarda yaklaşık %76'lık bir azalma sağlanmıştır. Ayrıca çeşitli sanayi sektörlerinden 90'dan fazla ürün 'geri dönüştürülebilir ürün' olarak ilan edilmiş ve endüstrilerde bu ürünlerin kullanımı teşvik edilmiştir. Meng vd. [36] tarafından yapılan çalışmada ise; Çin'de katı atıkların çevresel etkilerini ve katı atık oluşumunu azaltmak amacıyla başlatılan 'Sıfır Atık Şehir' eylem planının pilot bölgelerde incelenmesi konu edilmiştir. 'Sıfır Atık Şehir' hedefine ulaşmak için önerilen yaklaşımlardan biri de endüstriyel katı atıkların azaltılmasıdır. Bu çerçevede, pilot şehirlerden biri olan Xuzhou'da hakim endüstri kollarından olan enerji santralleri ve kömür madenciliğindeki tüm proseslerde atık azaltımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Buna göre teknolojik açıdan geri kalan madenler kapatılmış geriye kalanlarda ise atık oluşumunu azaltmak amacıyla yeşil madencilik uygulamalarına geçilmiştir. Xuzhou şehrinde endüstriyel katı atıkların yeniden kullanım oranı 2018 ile 2020 arasında %8 artarak %98'e yükselmiştir. İki yıldan fazla süren pilot çalışmanın ardından Xuzhou şehrinde, ekonomiye katılan birim para başına oluşan atık miktarının bir ölçüsü olan endüstriyel katı atık oluşum yoğunluğu takip edilmiş ve bu değer 10 000 Çin Yuanı başına 0.59 tondan 0.53 tona gerileyerek %10.2 oranında azaldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra çeşitli katı atıkların tekrar kaynak olarak kullanım oranında önemli bir artış sağlanmıştır.

2019 yılında Sıfır Atık Yönetmeliği'nin yayımlanmasıyla birlikte kurum içinde 2019 yılı öncesi döneme göre yeniden kullanıma yönelik farkındalık artmıştır. Ayrıca kurum içinde uygulanan tasarruf tedbirleri politikasıyla birlikte, tekrar kullanılabilir durumda olan atıklara olan talep yıllar içinde artış göstermiştir [37]. Bu durum, kurumda sıfır atık yönetim sisteminin gelişmesine önemli bir katkı sağlamıştır. 2024 yılının Mayıs ayında yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Genelgesi ile kamu kaynaklarının etkili, ekonomik ve verimli kullanımına ilişkin yeni tedbirler belirlenmiştir. Yayımlanan tedbirlerin kurum içinde sıfır atık yönetim sistemine olumlu yönde katkı sağlayacağı öngörülmektedir [38]. Tablo 4'te yeniden kullanım oranının, sıfır atık sisteminin de desteklediği şekilde yıllar içinde artış eğiliminde olduğu görülmektedir.

2022 yılında İSKİ'de oluşan ve kamu kurumlarında değerlendirilen atık miktarının diğer yıllara göre ciddi bir şekilde fazla çıkmasının nedeni, çeşitli deformasyonlardan ötürü kurum içinde kullanım imkanı bulunmayan plastik ve döküm boruların o yıl içerisinde daha yüksek miktarda oluşması ve sıfır atık kapsamında atık miktarının azaltımı ile yeniden değerlendirilmesi gözetilerek talep eden diğer kamu kurumlarına verilmesidir. Kurum içi ve diğer kamu kurumlarında yeniden kullanılan atıklar incelendiğinde metal bileşenlerin en fazla olduğu ve bunun yanı sıra plastik, ahşap ve elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının bulunduğu görülmektedir. Diğer kamu kurumlarına örnek

olarak, ilçe belediyeleri, kaymakamlıklar ve eğitim kurumları verilebilir. İSKİ'de oluşan ve yeniden kullanımda en çok tercih edilen malzemeler arasında çeşitli ebat ve türdeki borular, basınç pompası, rögar kapağı, hidrant, masa, sandalye ve dolap bulunmaktadır. Literatürde; Lu vd. [39] tarafından Çin'in Shenzhen şehrinde yapılan çalışmada 'şantiye düzeyinde sıfır atık' hedefine ulaşmak amacıyla yapılan vaka analizinde Huangmugang Köprüsü Kavşağı'nın yıkımı sonucunda ortaya çıkan kirli bloklar anayol yapımında; kutu menfez alanı ise belediyeye ait boru hatlarının döşenmesi amacıyla bir boru tüneli inşasında kullanılmıştır. Böylece köprüsü kavşağına ait yıkım atıklarının %5'inin doğrudan yeniden kullanılması sağlanmıştır. Usapein ve Chavalparit [40] tarafından yapılan çalışmada, sürdürülebilir atık yönetimi felsefesi ile depolama alanlarına sıfır atık gönderilmesi hedefiyle atık azaltma, atıkların yeniden kullanımı ve geri dönüşümü anlayışının Tayland'da bir petrokimya fabrikasında uygulanması amaçlanmıştır. Fabrikada oluşan tehlikeli ve tehlikesiz atık türleri incelenmiş, atık bünyesine dış ortamdan su nüfuz ettiği için vasfını yitirmiş veya yağ ve diğer kimyasal maddelerle kontamine olmuş izolasyon atıklarının, kontamine olmamış atıklarla birlikte depolanmadığı ve kontamine olmuş her türlü konteynerin tehlikeli atık olarak sınıflandırılarak depolama sahasına gönderildiği tespit edilmiştir. Taş yünü, refrakter tuğla, köpük cam ve poliüretan köpük gibi izolasyon atıklarının türlerine göre ayrılarak kontamine olmamış olanların sahada yeniden kullanılması ve yeniden kullanılabilir durumda olan konteynerlerin yeniden kullanılması önerilmiştir. Sonuç olarak fabrikada oluşan izolasyon atıklarının %1'i ve konteyner atıklarının %28'i yeniden kullanılmıştır. Böylece depolama alanına gönderilen atık miktarının azalmasına katkı sağlanmıştır.

3.2 Atık bileşenlerinin dağılımının incelenmesi

2019 – 2023 yıllarında İSKİ'de oluşan atıkların bileşenlere göre dağılımı Şekil 5'te verilmektedir. Bu dağılıma göre; incelenen beş yıl boyunca oluşan atıkların %90'dan fazlasını tehlikesiz atıkların oluşturduğu görülmektedir. Beş yıl boyunca oluşan atık miktarları yıllık olarak incelendiğinde atık demir oranı %48 ile %59 arasında değişmektedir ve tüm yıllarda en büyük paya sahip olan bileşendir. Atık demiri takip eden ve toplam atık içindeki payı %25 ile %32 arasında değişen ikinci bileşen ise atık pik ve sferodur. Atık elektrikli ve elektronik ekipmanlar 2019 – 2023 yılları arasında %2 ile %7 arasında değişirken, atık plastik oranı %1 ile %6 arasında değişim göstermektedir. Diğer atıklar ise; bunların dışında kalan ve kurum içinde oluşan diğer tüm atıkları ifade etmektedir. Bu kapsama giren atıklar, çelik, bakır, alüminyum, pirinç, toner-kartuş, izoleli kablo, ahşap, tüp, akümülatör, ömrünü tamamlamış lastik, bitkisel ve madeni atık yağlar, tıbbi atık, biyobozunur atık, floresan lamba ve pillerdir. Diğer atıkların toplam atık miktarı içindeki değişim oranı %7 ile %18 arasındadır. Öte yandan, Şekil 6'da belirlenen beş farklı atık bileşenine ait miktarların yıllara göre değişimi verilmektedir. Buna göre, demir, pik ve sfero, plastik ve elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının 2019 yılında

diğer yıllara göre daha yüksek miktarda olduğu görülmektedir.

Atık Yönetimi Yönetmeliği ekinde yer alan atık kodu listesine göre 17 04 bölüm koduna sahip atıklar metal olarak tanımlanmaktadır. Oluşan atıklardan metal kapsamına girenler arasında demir, çelik, pik ve sfero, bakır,

alüminyum, pirinç ve izoleli kablo bulunmaktadır. İSKİ'deki son beş yıla ait atık oluşum miktarlarına bakıldığında bu tanımlamaya göre 2022 yılı hariç, her yıl oluşan atıkların %80'den fazlası metal olarak sınıflandırılmaktadır.

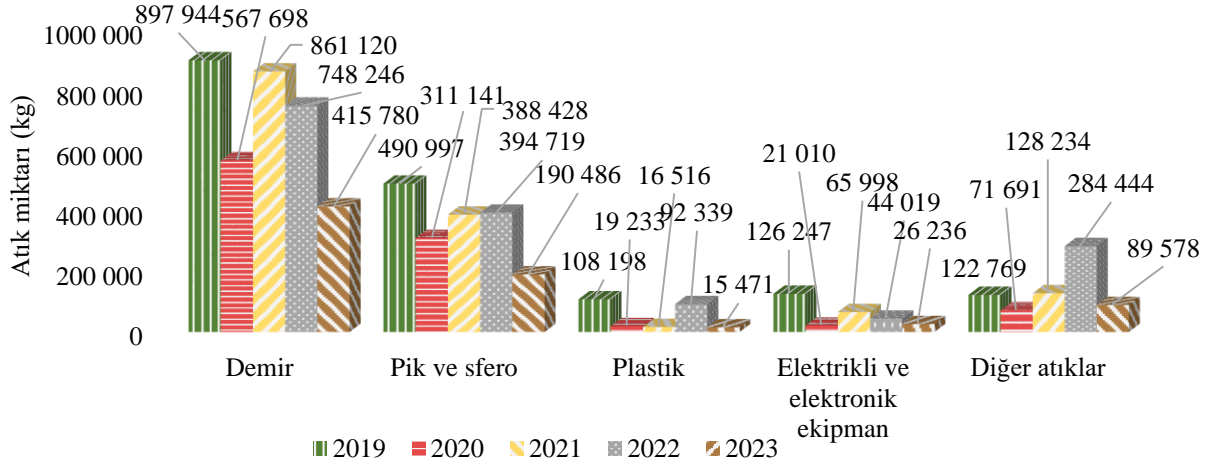
Tablo 4. İSKİ'de oluşan atıkların yıllara göre yeniden kullanım miktarı ve oranları

Yıl	Toplam atık oluşumu (kg)	Yeniden kullanım		Toplam miktar (kg)	Yeniden kullanım oranı (%)
		Kurum içinde değerlendirilen miktar (kg)	Diğer kamu kurumlarında değerlendirilen miktar(kg)		
2019	1 746 155	2 320	3 240	5 560	0.3
2020	990 773	1 785	5 760	7 545	0.8
2021	1 460 296	15 411	18 100	33 511	2.3
2022	1 563 767	6 040	165 100	171 140	10.9*
2023	737 551	4 740	15 365	20 105	2.7

* 2022 yılına ait münferit durum dikkate alınmadığında yeniden kullanım oranı %2.0 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Oluşan atık türlerinin yıllara göre dağılımı



Şekil 6. 2019 - 2023 yılları arasında bileşenlere göre atık miktarlarının dağılımı

İstanbul'da içme suyu hatlarında İSKİ tarafından genellikle 2 çeşit boru tipi kullanılmaktadır. Bunlar çelik ve düktil font borulardır. Dere geçişi, köprü geçişi gibi esnek malzeme kullanmayı gerektiren durumlarda ise nadir de olsa yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) boru kullanılmaktadır. Kullanılan pompa, vana, vantuz vb. mekanik ekipmanlar ise sfero dökümdür. Demir bileşenlere ise çeşitli borular, İSKİ arıtma tesisleri, şube müdürlükleri ve sosyal tesislerindeki yıkıntı atıkları içindeki demirler örnek olarak verilebilir. Genellikle bu tür malzemelerin kullanılması oluşan atıkların büyük bir bölümünün metal olmasında etkili olmuştur.

Metaller asıl özelliklerini kaybetmeden, kalitelerini ve işlevselliğini koruyarak defalarca geri dönüştürülebilmeleri sebebiyle, döngüsel ekonominin desteklenmesi bağlamında oldukça uygun atık bileşenleridir [41]. Ekonomik ömrünü tamamlayarak atık durumuna gelmiş demir çelik hurdalarının geri dönüştürülmesinin hem enerji tasarrufu hem de çevresel etkiler açısından birçok faydası vardır [42]. Dünyada Amerika Birleşik Devletleri (ABD) en büyük hurda metal üreticisi ve ihracatçısıdır. ABD'de otomobil ve kamyon üretiminde otoyol, köprü ve demiryollarında, konut ve ticari binalarda ayrıca savunma sanayiinde silah üretiminde büyük ölçüde çelik kullanılmaktadır [43].

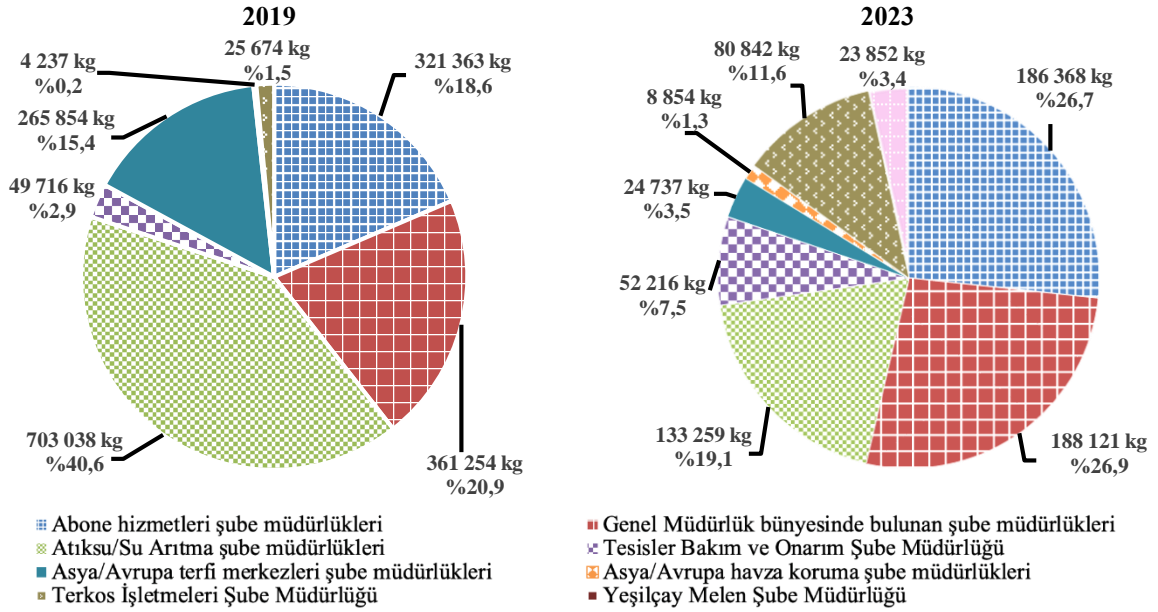
ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA) hurda çelikten üretilen her bir ton çelik için 1 115 kg demir cevheri, 625 kg kömür ve 53 kg kireçtaşı tasarrufu sağlandığını, ayrıca metallerin geri dönüştürülmesi ile enerjiden %75, hammaddeden %90 tasarruf sağlandığını, su kullanımının %40 ve maden atıklarının ise %97 oranında azalttığını bildirmiştir. Kullanılan kaynak ve enerji miktarının azaltılması, sıfır atık yaklaşımı açısından da önemli bir katkı sağlamaktadır.

3.3 Atık taşıma maliyetlerinin değerlendirilmesi

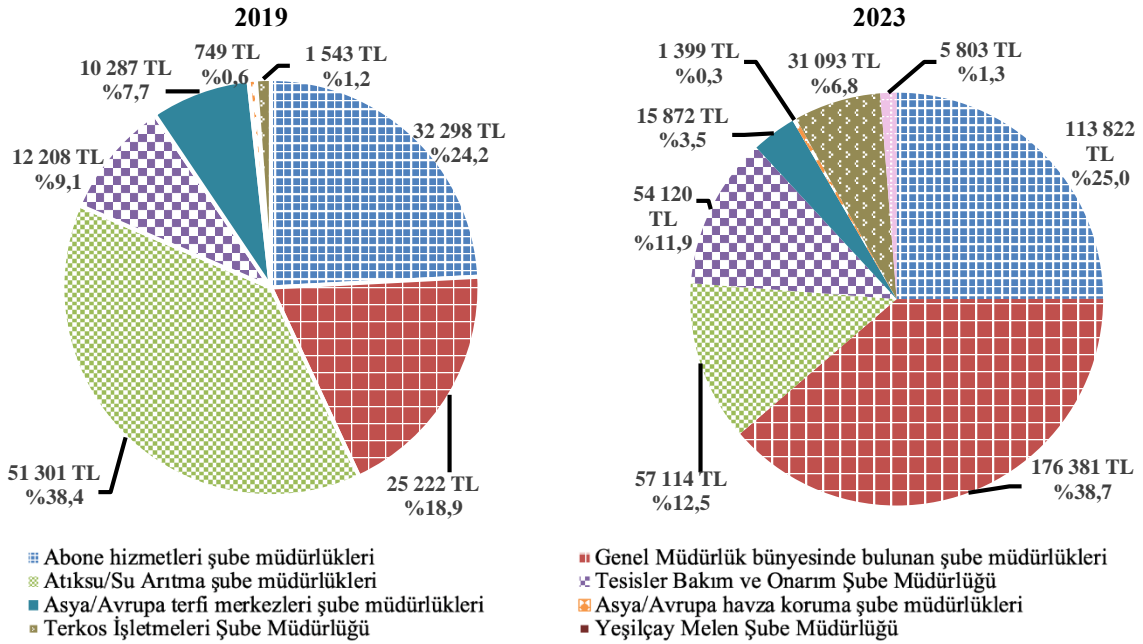
3.3.1 Farklı idari birimlerdeki atık oluşumunun incelenmesi

İSKİ'de atık oluşturan birimler, yapılan çalışma kapsamında daha anlaşılır bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla kendi içinde gruplandırılarak 8 idari birime ayrılmıştır. Bu idari birimler; farklı ilçelerde bulunan ve abone hizmetlerini yürüten 32 adet şube müdürlüğü, arıtımlardan sorumlu atıksu/su arıtma şube müdürlükleri, Asya/Avrupa terfi merkezleri şube müdürlükleri, Terkos İşletmeleri Şube Müdürlüğü, Genel Müdürlük yerleşkesinde bulunan şube müdürlükleri, İSKİ'ye ait tüm binaların, arıtma tesislerinin ve sosyal tesislerin bakım ve onarımından sorumlu Tesisler Bakım ve Onarım Şube Müdürlüğü, Asya/Avrupa havza koruma şube müdürlükleri ve Yeşilçay Melen Şube Müdürlüğü'nden oluşmaktadır. Şekil 7'de 2019 ve 2023 yıllarında oluşan atık miktarlarının idari birimlere göre dağılımı verilmektedir.

En yüksek paya sahip idari birimler incelendiğinde toplam atık oluşumunun 2019 yılında %40.6'sı Atıksu/su arıtma şube müdürlüklerinde, 2023 yılında ise %26.9'u Genel Müdürlük bünyesinde bulunan şube müdürlüklerinde gerçekleşmiştir. 2019 ve 2023 yılları için idari birimlere ait taşıma maliyetinin dağılımı ise Şekil 8'de gösterilmektedir. 2019 ve 2023 yıllarındaki atık taşıma maliyetinin oluşum yerlerine göre dağılımı incelendiğinde 2019 yılında en büyük payın 51 301 TL (7 957 EUR (2019'daki ortalama döviz kuruna göre)) ile atık su/su arıtma şube müdürlüklerine ait olduğu görülmüştür. Bu durum, 2019 yılında Anadolu Yakası'ndaki bir su arıtma tesisinde gerçekleştirilen yenileme çalışmalarıyla açıklanabilir. İlgili arıtma tesisinde bulunan çöktürme havuzlarındaki poliüretan lamellerin kullanım ömrünün dolması sonucu yenilenmesi bu oranın yüksek olmasında büyük rol oynamıştır. 2023 yılında ise en büyük paya sahip olan idari birim 176 179 TL (6 204 EUR (2023'teki ortalama döviz kuruna göre)) ile Genel Müdürlük bünyesinde bulunan şube müdürlükleridir. Bu durumun en önemli sebebi ise İSKİ Silivri Eğitim ve Dinlenme Tesisleri'nde yapılan tadilat ve yenilemeler sonucu Silivri'den Paşaköy Atık Geçici Depolama Alanı'na taşınan atıklardır.



Şekil 7. İSKİ'de 2019 ve 2023 yıllarında oluşan atık miktarlarının idari birimlere göre dağılımı



Şekil 8. İSKİ'de 2019 ve 2023 yıllarında atık taşıma maliyetlerinin idari birimlere göre dağılımı

2019 yılında Anadolu Yakası'ndaki birimlerden 227, Avrupa Yakası'ndaki birimlerden ise 286 kamyon atık (toplam 513 adet) Paşaköy'de bulunan depolama alanına taşınmıştır. 2023 yılında ise; Anadolu Yakası'ndaki birimlerden 98, Avrupa Yakası'ndaki birimlerden 178 kamyon atık (toplam 276 adet), depolama alanına taşınmıştır. Bu taşımının maliyeti 2019 yılında 133 607 TL (20 724 EUR (2019'daki ortalama döviz kuruna göre)) iken 2023 yılında 455 603 TL (16 045 EUR (2023'teki ortalama döviz kuruna göre)) olarak hesaplanmıştır. Her iki yıl için de Anadolu Yakası'ndan depolama alanına atık taşıma maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %15'ini oluştururken

Avrupa Yakası'ndan depolama alanına atık taşıma maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %85'lik kısmını oluşturmaktadır. Avrupa Yakası'nda Anadolu Yakası'na göre daha fazla birim bulunması ve daha fazla atık oluşması sebebiyle ele alınan dönem boyunca atık taşıyan kamyon sayısı ve dolayısıyla atık taşıma maliyeti daha fazla olmuştur. 2023 yılında 2019 yılına göre oluşan ve depolama alanına taşınan atık miktarı, buna bağlı olarak da kamyon sayısı daha az olmasına rağmen atık taşıma maliyeti TL bazında daha fazla hesaplanmıştır. Bunun sebebi ise 2019 – 2023 dönemindeki enflasyonun köprü/otoyol ve yakıt ücretleri üzerindeki etkisi olmuştur. Bununla birlikte, taşınan atık miktarındaki

azalmanın, atık taşıma maliyetinin EUR bazında azalmasına sebep olduğu görülmektedir.

2019 ve 2023 yıllarında atık oluşumu farkının atık taşıma maliyetine etkisini incelemek amacıyla enflasyon etkisi ortadan kaldırılarak hesaplama yapılmıştır. 2019 yılındaki atık taşıma maliyetini 2023 yılına taşıyarak aynı birim maliyetler üzerinden karşılaştırma yapılarak taşıma maliyetleri arasındaki fark incelenmiştir. Bu amaçla, 2019 yılına ait hesaplamaların 2023 birim maliyetlerine göre tekrar yapılması durumunda; 2023 yılındaki toplam taşıma maliyeti 455 603 TL iken 2019 yılındaki yeni maliyet 655 254 TL olarak hesaplanmıştır. Sıfır atık sisteminin kurulmasıyla birlikte, aynı birim maliyetler kullanılarak 2019 yılından 2023 yılına atık taşıma maliyetinin yaklaşık %30 oranında azalmış olduğu görülmüştür. Sıfır atık yaklaşımında ana hedeflerden biri de kaynakların verimli kullanılmasıdır. Bu çerçevede atık taşıma maliyetinin azalması, kuruma Atık Yönetimi Birimi tarafından atık getirecek olan birimlere haftanın aynı gününe randevu verilmesinin de etkisi bulunmaktadır. Böylece Genel Müdürlükte bulunan Atık Yönetimi Birimi'ne ait aracın depolama alanına gidiş sayısı azaltılmış olmaktadır. Bu uygulama, 2019 yılında İSKİ'de sıfır atık yönetim sisteminin kurulması ile başlatılmış olmasına rağmen 2021 yılında yayımlanan ve kamu kurumlarında uygulanacak tasarruf tedbirlerini içeren Cumhurbaşkanlığı Genelgesi ile etkin şekilde uygulanmaya başlamıştır [27].

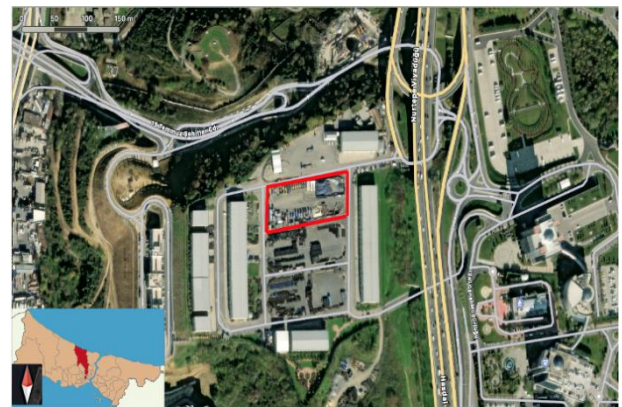
Kurniawan vd. [44] tarafından yapılan çalışmada kentsel katı atık miktarındaki artış nedeniyle çevresel sorunlarla karşı karşıya kalan Endonezya'da sıfır atık sisteminin nasıl uygulanacağına dair araştırma yapılmıştır. Endonezya'daki birçok şehir için atık yönetiminin; kamu hizmeti olarak yürütüldüğü ve yalnızca toplama maliyetlerinin katı atık yönetim bütçesinin %80'i ile %90'ı arasında değiştiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında Endonezya'nın Sukunan Köyü'nde belediye katı atıklarının oluşumunu kontrol etmek amacıyla yerel toplumu atık ayrımı ve atık geri dönüşümü için harekete geçiren toplum temelli bir katı atık yönetimi benimsenmiştir. Köy halkının gerçekleştirdiği geri dönüşüm faaliyetleri sonucunda üretilen atıkların %30 oranında azaldığı görülmüş ve bu durumun atık toplama, taşıma ve bertaraf konusunda kamu bütçesinden tasarruf edilmesini ve atık depolama sahalarının kullanım süresinin uzamasını sağladığı belirtilmiştir.

3.3.2 Avrupa Yakası'nda atık depolama alanı oluşturulmasının değerlendirilmesi

İSKİ'de atıkların %65'ten fazlası Avrupa Yakası'ndaki birimlerde oluşmaktadır. Bu yakadan Paşaköy Atık Geçici Depolama Alanı'na yapılan taşıma, tehlikeli atıkların uzun mesafeler boyunca taşınması sırasında oluşabilecek mahzurlara, yüksek miktarda nakliye maliyetlerine ve trafikte geçen uzun süre sebebiyle zaman kaybına neden olmaktadır. Atık Yönetimi Yönetmeliği'nin 5'inci maddesinin (i) bendinde ifade edilen 'Atıkların üretildikleri/buldukları yere en yakın ve en uygun tesise en hızlı şekilde ulaştırılarak, uygun yöntem ve teknolojiler kullanılarak işlenmesi esastır.' hükmü ve sıfır atık yaklaşımında, kaynakların verimli kullanılması hedefi

gereğince Avrupa Yakası'nda bir atık geçici depolama alanı kurulmasının hem meydana gelebilecek tehlikelerin önlenmesi hem de maliyet ve zaman tasarrufu açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir. Buna göre; çalışma kapsamında Avrupa Yakası'nda bir atık geçici depolama alanı kurulması durumunda atık taşıma maliyetindeki değişimi değerlendirmek amacıyla bir senaryo oluşturulmuştur. Senaryoda, Atık Yönetimi Birimi'nin de yer aldığı İSKİ Genel Müdürlüğü yerleşkesinde bulunan ambar bölgesine Avrupa Yakası'nda bulunan birimlerden gelen atıklar için yaklaşık 4 500 m²'lik alana sahip atık geçici depolama alanı oluşturulması planlanmıştır. Bu alan Şekil 9'daki uydu görüntüsünde kırmızı çizgiler ile işaretlenmiştir. Ele alınan senaryoda, Avrupa Yakası'nda bulunan şube müdürlüklerinin oluşturulacak yeni atık geçici depolama alanını kullanacağı, Anadolu Yakası'nda bulunan şube müdürlüklerinin ise Paşaköy Atık Geçici Depolama Alanı'nı kullanmaya devam edecekleri öngörülmüştür.

2024 – 2028 yılları için sadece Paşaköy Atık Geçici Depolama Alanı'nın kullanımının devam etmesi durumunda (Senaryo 1) ve Avrupa Yakası'ndaki birimlerin bu yakada oluşturulacak yeni geçici depolama alanını kullanmaya başlaması durumundaki (Senaryo 2) atık taşıma maliyetleri için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için geçmiş beş yılda atık getiren birimler ve atıkların taşındığı kamyon sayıları, ayrıca köprü/otoyol ücretleri ile akaryakıt fiyatlarının değişimi incelenmiştir. Atık kamyon sayılarının belirlenebilmesi amacıyla son beş yıl içinde her birime ait atık miktarları, atık kamyon sayıları ve diğer araç sayıları değerlendirilmiş, atık miktarlarında yıldan yıla görülen dalgalanmalar sebebiyle sonraki beş yıl için bu verilerin ortalaması alınarak her birime ait araç sayısı sabit tutulmuştur. 2024 yılı için belirlenmiş olan köprü/otoyol ücretleri ile akaryakıt fiyatları hesaplamalarda kullanılmış, Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası'nın önümüzdeki beş yıllık enflasyon tahminleri dikkate alınarak 2028'e kadar söz konusu maliyetlerin her yıl için ortalama %15 oranında artacağı kabul edilmiştir [45].



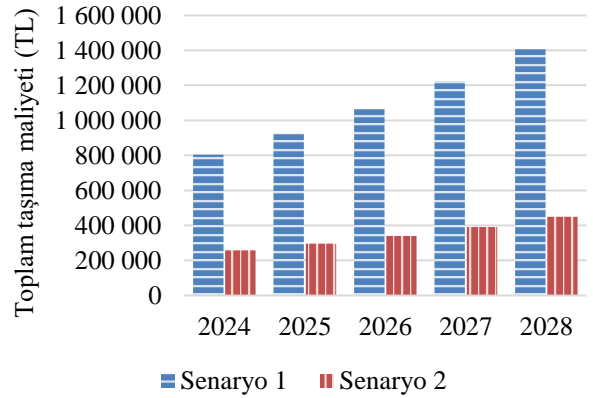
Şekil 9. Senaryo 2 kapsamında Avrupa Yakası'nda kurulması öngörülen depolama alanına ait uydu görüntüsü

Tablo 5. Senaryo 1 ve 2'ye ait ayrıntılı maliyet incelemesi

Yıl	Atık taşıma maliyeti (TL)	Birim Atık Sorumlusu aracının ulaşım maliyeti (TL)	Atık Yönetimi Birimi aracının ulaşım maliyeti (TL)	Taşıma maliyeti toplamı (TL)
Senaryo 1				
2024	701 722	49 040	53 625	804 387
2025	806 980	56 318	61 593	924 891
2026	927 387	64 759	70 826	1 062 972
2027	1 067 553	74 541	81 510	1 223 604
2028	1 227 903	85 730	93 748	1 407 380
Senaryo 2				
2024	218 662	18 765	19 705	257 132
2025	251 456	21 542	22 632	295 630
2026	288 945	24 770	26 025	339 739
2027	332 676	28 523	29 952	391 150
2028	382 656	32 801	34 448	449 905

Tablo 5'te gelecek beş yılda Senaryo 1 ve Senaryo 2 için hesaplanan taşıma maliyetleri birlikte verilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre her iki senaryoda da atık taşıma maliyetinin diğer maliyet kalemlerinden yüksek olduğu görülmüştür. Geçici depolama alanına atık taşıyan kamyon sayısı, birim atık sorumlularının kullandığı araç sayısı ve Atık Yönetim Birimi'nin ulaşımında kullanılan araç sayısı sabit tutulmasına rağmen gerçekleşen enflasyon etkisiyle taşıma maliyetleri yıllar içinde artış eğilimindedir. Şekil 10'da 2024 – 2028 yılları arasında Senaryo 1 ve 2 için toplam taşıma maliyetindeki değişime ait grafik verilmektedir. 2024-2028 arasında tüm yıllarda Senaryo 1 için toplam taşıma maliyeti Senaryo 2'den fazla hesaplanmıştır. Senaryo 2'nin uygulanması durumunda Senaryo 1'e göre ele alınan dönemdeki her yıl için taşıma maliyetinin %68 daha düşük olduğu görülmüştür. Başka bir ifade ile Avrupa Yakası'nda Anadolu Yakası'nda bulunan geçici depolama alanına ilave olarak yeni bir geçici depolama alanı oluşturulmasının kuruma %68 oranında maliyet tasarrufu sağlayacağı öngörülmektedir.

Maliyetlerin azalmasındaki en önemli gerekçenin, Avrupa Yakası'ndaki birimlerde oluşan atıkların yeni oluşturulan depolama alanına transferi sırasında kullanılan kamyon ve diğer araçların katedeceği ortalama mesafenin mevcut depolama alanına göre kısılması ve atık taşıyan kamyonların Avrupa Yakası'ndan Anadolu Yakası'na geçişte kullandıkları köprü kullanımının sona ermesidir. Senaryo 2'nin uygulamaya konması kurum içinde kaynakların verimli kullanımı açısından önemlidir. Bu uygulamanın, kurumdaki sıfır atık yönetim sisteminin gelişmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 10. Senaryo 1 ve 2 için atık taşıma maliyetlerinin karşılaştırması

4 Sonuçlar

Sıfır atık yaklaşımı atık azaltımı, atıkların yeniden kullanımı ve geri dönüşümü gibi stratejilerle katı atık yönetimi ile ilgili sorunların çözümünde etkili bir yol olarak görülmektedir. Kurumlar, oluşturdukları atıkları sıfır atık sistemine uyumlu şekilde yöneterek atık yönetiminin çevresel etkilerini en aza indirebilir, atık yönetimi maliyetlerini azaltabilir ve daha sürdürülebilir bir sisteme geçiş yapabilirler. Kurumsal atık oluşumunun gerçekleştiği su ve kanalizasyon idarelerinden biri olan İSKİ'de 2019 – 2023 yılları arasında oluşan atık türleri, miktarları ve atık yönetimi süreçleri incelenmiştir. 2019 yılında 'Sıfır Atık Yönetmeliği'nin yayımlanmasıyla kurum içinde sıfır atık yönetim sistemine geçiş süreci başlamıştır. İSKİ'de beş yıllık dönem incelendiğinde hizmet verilen nüfusun sürekli arttığı, buna karşın atık oluşum miktarlarının azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu durumun, kurum içi

sıfır atık sistemi performansında gelişme kaydedildiğini göstermesi açısından önemli olduğu belirtilebilir.

İSKİ tarafından yapılan hat yenileme çalışmaları sırasında devreden çıkarılan hatlara ait elemanların (boru, vana vb.) yerinden kaldırılması ve taşınmasındaki yüksek maliyet ile yoğun trafik hareketliliği nedeniyle söz konusu malzemelerin bulunduğu yerde bırakılması ihtimali bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, devreden çıkarılan hatlara ait boru parçaları ve diğer elemanların atık haline geldikten sonraki sürecin sağlıklı bir şekilde kadar takip edilememesi sonucunda geçici depolama alanına kabulünün sağlanamaması ve başka mevkilere götürülmesi de (izinsiz geri dönüşüm, kaçak döküm vb. amacıyla) imkan dahilindedir. Bu ihtimaller nedeniyle, fiili durumda oluşan toplam atık miktarının, İSKİ Atık Yönetimi Birimi'ne ait kayıtlarda verilen miktarlara göre nispeten yüksek olması düşünülmektedir. Atık haline gelen malzemelerin takibinin dikkatle yapılarak sürecin kontrollü bir şekilde yönetilmesi, kaynak yönetiminin iyileştirilmesi ile atıkların yeniden kullanım oranının artırılmasını sağlamak açısından önemlidir.

Atık yönetim sürecinin daha kontrollü yürütülmesi ve atık envanterinin eksiksiz tutulabilmesi için atılması gereken önemli bir adım, geçici depolama alanına alınmadan doğrudan bertaraf veya geri kazanım tesislerine yönlendirilen atık miktarlarının kayıt altına alınmasıdır. Bu sayede, kurum sınırları içinde oluşan tüm atık bileşenlerinin miktarları belirlenerek, hem sıfır atık sisteminin performansı daha sağlıklı izlenebilir hem de daha kurumsal bir atık yönetim sistemi oluşturulabilir.

İSKİ'de oluşan atıkların kurum içinde ve diğer kamu kurumlarında yeniden kullanım oranında ise sıfır atık hedeflerine uyumlu şekilde artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu duruma kamu kurumlarında uygulanan tasarruf tedbirleri politikasının da etkisi bulunmaktadır. Depolama alanına gönderilen atıklar içinde yeniden kullanılabilir durumda olan malzemeler bulunmakta ve bunların ihtiyaç duyan birimlere verilmesi konusunda gerekli bilgilendirmelerde eksiklikler yaşanmaktadır. Bu durumun önlenmesi amacıyla, tehlikesiz atıkların geçici depolama alanında en fazla bir yıl süreyle depolanabileceği göz önünde bulundurularak yıl içinde belirli periyotlarla envanter çalışmaları yapılarak malzeme ihtiyaçlarının öncelikli olarak depolama alanında bulunan malzemelerden sağlanmasının isabetli olacağı düşünülmektedir. Konu ile ilgili sorumlu personeller belirlenerek ihtiyaç duyan birimlerle koordinasyonun sağlanması halinde hem yeniden kullanım oranında artış, hem de satın alınacak yeni malzeme maliyetlerinden tasarruf sağlanacağı öngörülmektedir. Bu uygulama, atık yönetiminde sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi prensipleri ile uyumlu olmasının yanı sıra sıfır atık hedeflerine yönelik önemli bir adım olma potansiyeline sahiptir.

Çalışma kapsamında oluşan atıkların geçici depolama alanına taşınması maliyetlerine yönelik analizler yapılmıştır. 2019 yılında hesaplanan atık taşıma maliyetleri 2023 yılı verileri kullanılarak tekrar hesaplandığında, 2023 yılındaki taşıma maliyetlerinin sıfır atık sisteminin kurulmasının etkisiyle %30 oranında azaldığı görülmüştür.

Atık oluşum miktarı azalma eğiliminde olmasına rağmen hem akaryakıt, otoyol ve köprü ücretlerinin artışı hem de Avrupa Yakası'ndan Anadolu Yakası'na atıkların taşınması sebebiyle mevcut taşıma maliyetlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Avrupa Yakası'ndaki birimlerde Anadolu Yakası'na göre daha fazla atık oluştuğu göz önünde bulundurularak taşıma maliyetlerini azaltmak amacıyla Avrupa Yakası'nda İSKİ Genel Müdürlüğü yerleşkesinde bulunan ambar bölgesinde yeni bir atık depolama alanı kurulması önerilmektedir. Bu önerinin uygulamaya geçmesi halinde kuruma beş yıllık süreç boyunca yıllık %68 oranında maliyet tasarrufu sağlayacağı öngörülmektedir. Bu durumun, kurum içi sıfır atık yönetim sisteminde hedeflenen verimli kaynak kullanımını açısından faydalı bir uygulama olacağı düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında incelenen ve bir su ve kanalizasyon idaresi olan İSKİ'deki atık oluşumunun en önemli nedeninin altyapı çalışmalarındaki inşaat, tadilat, bakım ve onarım işlerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Altyapı çalışmalarından kaynaklanan atık miktarları göz önüne alınarak bu atıkların, sıfır atık yönetimi kapsamında ne şekilde daha iyi değerlendirilebileceği konusunda literatürde yeterli sayıda çalışma bulunmaması sebebiyle bu konuda daha fazla araştırma yapılması büyük önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında hesaplanan yıllara bağlı atık miktarı (kg)/ abone oranı performans göstergesi olarak belirlenerek başka su ve kanalizasyon idarelerinde yapılacak çalışmalarda karşılaştırma amacıyla kullanılabilir. Bu sayede, farklı su ve kanalizasyon idarelerinin atık yönetimi açısından performanslarının mukayeseli olarak değerlendirilmesi sağlanabilir. Gelecek çalışmalarda, farklı coğrafi şartlara ve iklim koşullarına sahip yerleşim yerlerinde bulunan su ve kanalizasyon idarelerinin yanı sıra hizmet verdiği nüfus bakımından İSKİ'ye göre farklılık arz eden su ve kanalizasyon idarelerinde sıfır atık yönetim sisteminin incelenmesi ile yapılan çalışmanın kapsamının genişletilebileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan bilgilerin temini ve verilerin kullanılması ile ilgili verdiği izin için İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne teşekkür etmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] J. Singh, R. Laurenti, R. Sinha and B. Frostell, Progress and challenges to the global waste management system. Waste Management and Research, 32(9), 800-812, 2014. <https://doi.org/10.1177/0734242X14537868>.
- [2] Q. Song, J. 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>.

- [3] M. Kurdve, S. Shahbazi, M. Wendin, C. Bengtsson and M. Wiktorsson, Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: A case study approach. *Journal of Cleaner Production*, 98, 304-315, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.076>.
- [4] S.D. Mancini, G. A. de Medeiros, M. X. Paes, B. O. S. de Oliveira, M. L. P. Antunes, R. G. de Souza, J. L. Ferraz, A. P. Bortoleto and J. A. P. de Oliveira, Circular Economy and Solid Waste Management: Challenges and Opportunities in Brazil. *Circular Economy and Sustainability C. 1*, Sayı 1, ss. 261-282, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00031-2>.
- [5] S. Kumar, A. D. Chintagunta, K. C. Sherpa and R. Banerjee, Institutional waste management. *Advances in Solid and Hazardous Waste Management* ss. 49-63, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57076-1_3.
- [6] A. Demirbas, G. Edris, and W. M. Alalayah, Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects C.* 39, Sayı 10, ss. 999-1006, 2017. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1283551>.
- [7] Atık Yönetimi Yönetmeliği. T.C. Resmi Gazete, 29314, 2015. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>.
- [8] A. U. Zaman, and S. Lehmann, The zero waste index: A performance measurement tool for waste management systems in a “zero waste city”. *Journal of Cleaner Production*, 50, 123-132, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.041>.
- [9] O. Romero-Hernández, and S. Romero, Maximizing the value of waste: From waste management to the circular economy. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 757-764, 2018. <https://doi.org/10.1002/tie.21968>.
- [10] J. Malinauskaite, H. Jouhara, D. Czajczyńska, P. Stanchev, E. Katsou, P. Rostkowski, R. J. Thorne, J. Colón, S. Ponsá, F. Al-Mansour, L. Anguilano, R. Krzyżyńska, I. C. López, A. Vlasopoulos and N. Spencer, Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 141, 2013-2044, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>.
- [11] European Commission. Directive (EU) 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste (Text with EEA relevance), 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32018L0850>
- [12] European Commission. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance), 2008. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098>.
- [13] European Commission. Communication from the commission to the European Parliament, The council The european economic and social committee and the committee of the regions, Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy, 2015. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF
- [14] European Commission, Circular economy action plan, 2020. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en.
- [15] European Commission, The European Green Deal, 2019. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
- [16] WRAP. (Waste & Resources Action Programme). Materials Resource Efficiency in Street Works Utility Industry Agreement, t.y.
- [17] C. Y. Young, S. P. Ni, and K. S. Fan, Working towards a zero waste environment in Taiwan. *Waste Management and Research (C. 28)*, Sayı 3, ss. 236-244, 2010. <https://doi.org/10.1177/0734242X09337659>.
- [18] Sıfır Atık Konulu Genelge 2024/24, T.C. Resmi Gazete, 32508, 2024.
- [19] Çevre Kanunu (Ek:24/12/2020-7261/17 md.), T.C. Resmi Gazete, 2872, 1983.
- [20] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Sıfır Atık Yönetim Sistemi Uygulama Kılavuzu – Kurum ve Kuruluş, 2020. <https://cevresehiriklimkutuphanesi.csb.gov.tr/ShowPDF/Oeda1d0f-6fdd-4eac-a9a3-936dd7606225>.
- [21] Sıfır Atık Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, 30829, 2019. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190712-9.htm>.
- [22] İSKİ, Rakamlarla İstanbul’da Su Yönetimi. <https://iski.istanbul>, Erişim tarihi: 29 Nisan 2024.
- [23] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü Kuruluş ve Görevleri Hakkında Kanun, T.C. Resmi Gazete, 17523, 1981. <https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/17523.pdf>.
- [24] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi 2021 – 2025 Stratejik Planı, 2020. https://cdn.iski.istanbul/uploads/Stratejik_Plan_2021_2025_1_e103e82664.pdf?_gl=1*5dgi5a*_ga*MTk0NzE5NzMwLjE3MTM3MDMzNDc.*_ga_RDP0Z933YX*MTcxNDQxNDUyMy4zLjEuMTcxNDQxNTI2NS4wLjAuMA.
- [25] İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi 2024 Performans Programı, 2024. https://cdn.iski.istanbul/uploads/2024_PERFORMANS_PROGRAMI_82da4531bf.pdf?_gl=1*6kc94n*_ga*MTk0NzE5NzMwLjE3MTM3MDMzNDc.*_ga_RDP0Z933YX*MTcxNDQxNDUyMy4zLjEuMTcxNDQxNTI2NS4wLjAuMA.
- [26] 7/2156 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı, T.C. Resmi Gazete, 13801, 1971.
- [27] 19/3/2001 tarih ve B.02.0.PPG.0.12-320-4421 sayılı Genelge, T.C. Başbakanlık Personel ve Prensipier Genel Müdürlüğü, 2001.
- [28] Y. Van Fan, P. Jiang, M. Hemzal, and J. J. Klemeš, An update of COVID-19 influence on waste management. *Science of the Total Environment*, 754, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142014>.

- [29] H. B. Sharma, K. R. Vanapalli, V. S. Cheela, V. P. Ranjan, A. K. Jaglan, B. Dubey, S. Goel, and J. Bhattacharya, Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105052>.
- [30] P. A. Jayasinghe, H. Jalilzadeh, and P. Hettiaratchi, The Impact of COVID-19 on Waste Infrastructure: Lessons Learned and Opportunities for a Sustainable Future. *International Journal of Environmental Research and Public Health C*. 20, Sayı 5, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054310>.
- [31] I. Piegdoń, and B. Tchórzewska-Cieślak, Seasonality of water supply network failure in the aspect of water supply safety. *E3S Web of Conferences*, 44, 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184400140>.
- [32] D. Młyński, T. Bergel, A. Młyńska and K. Kudlik, A study of the water supply system failure in terms of the seasonality: Analysis by statistical approaches. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(3), 289-302, 2021. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.151>
- [33] H. Rezaei, B. Ryan and I. Stoianov, Pipe failure analysis and impact of dynamic hydraulic conditions in water supply networks. *Procedia Engineering*, 119(1), 253-262, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.883>.
- [34] Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, Deterioration and inspection of water distribution systems a best practice by the national guide to sustainable municipal infrastructure, 2003.
- [35] R. K. Mazumder, A. M. Salman, Y. Li and X. Yu, Performance Evaluation of Water Distribution Systems and Asset Management. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(3), 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000426](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000426).
- [36] M. Meng, Z. Wen, W. Luo, and S. Wang, Approaches and policies to promote zero-waste city construction: China's practices and lessons. *Sustainability* (Switzerland), 13(24), 2021. <https://doi.org/10.3390/su132413537>.
- [37] Tasarruf Tedbirleri konulu Cumhurbaşkanlığı Genelgesi, T.C. Resmi Gazete, 31527, 2021.
- [38] Tasarruf Tedbirleri konulu Cumhurbaşkanlığı Genelgesi, T.C. Resmi Gazete, 32549, 2024.
- [39] W. Lu, Z. Bao, W. M. W. Lee, B. Chi, and J. Wang, An analytical framework of "zero waste construction site": Two case studies of Shenzhen, China. *Waste Management*, 121, 343-353, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.029>.
- [40] P. Usapein and O. Chavalparit, Development of sustainable waste management toward zero landfill waste for the petrochemical industry in Thailand using a comprehensive 3R methodology: A case study. *Waste Management and Research*, 32(6), 509-518, 2014. <https://doi.org/10.1177/0734242X14533604>.
- [41] EuRIC AISBL – Recycling: Bridging Circular Economy & Climate Policy, Metal Recycling Factsheet, Belçika, 2 Şubat 2020.
- [42] M. K. Şeşen, G. Başman ve N. Ünlü, Metal hurdalarının geri kazanılması. 1. Demir-çelik Sempozyum Bildirileri/115 sayfa 1019-1024, 2000.
- [43] Institute of Scrap Recycling Industries, 2023 ISRI Recycled Materials Industry Yearbook, p.25, Washington, ABD, 2023.
- [44] T. A. Kurniawan, R. Avtar, D. Singh, W. Xue, M. H. D. Othman, G. H. Hwang, I. Iswanto, A. B. Albadarin and A. O. Kern, Reforming MSWM in Sukunan (Yogyakarta, Indonesia): A case-study of applying a zero-waste approach based on circular economy paradigm. *Journal of Cleaner Production C*. 284, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124775>.
- [45] F. Karahan, Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Enflasyon Raporu Bilgilendirme Toplantısı 2024-1. Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası Başkanına ait Konuşma, Ankara, 8 Şubat 2024.





Yay-Şekli silindirik sandviç kompozit yapıların düşük hızlı darbe performanslarının farklı vurucu tipleri ve darbe açıları için incelenmesi

Investigation of low velocity impact performance of cylindrical sandwich structures arc-shaped core with different impact types and impact angles

İlyas Bozkurt^{1,*} 

¹ Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 49250, Muş Türkiye.

Öz

Bu çalışmanın amacı yay-şekli silindirik sandviç kompozit yapıların farklı geometri ve farklı darbe açıları için darbe performanslarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemektir. Çalışmada vurucu şeklinin, vurucu temas kuvveti, absorbe enerji verimliliği, maksimum yer değiştirme ve hasar deformasyonu üzerine etkileri incelenmiştir. Düşük hızlı darbe simülasyonları için *LS DYNA* sonlu elemanlar programında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda çekirdek yapısının desteklediği P2 noktasındaki temas kuvvet değerleri P1 (çekirdek destekli) noktasından yüksektir. Çekirdek desteği temas kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Vurucu açısı arttıkça ($\theta=30^\circ$ 'den 90° 'ye) temas kuvvet değeri 2.6 kat, enerji absorbe verimlilik değeri de 1.65 kat artmıştır. Koni vurucu ile elde edilen maksimum temas değeri silindirik ve küre uçlu vurucuya göre sırasıyla %35.1 ve %73.7 daha yüksek iken enerji absorbe verimlilik değeri ise sırasıyla %37.1 ve %36.2 daha yüksektir. Her üç vurucu için en büyük ve baskın hasar tipinin matris hasarı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Silindirik sandviç kompozit, Düşük hızlı darbe testi, İlerlemeli hasar analizi, Sonlu elemanlar yöntemi, Kohezif Bölge Modeli (CZM).

1 Giriş

Kompozit yapılar yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle, başta havacılık ve uzay endüstrisi olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır [1]. Özellikle son zamanlarda teknolojik gelişmeler ile beraber üretim makinelerinin ve üretim yöntemlerinin gelişmesiyle günlük hayatımızda bisiklet gövdelerinden, araba direksiyonlarına, dizüstü bilgisayar kılıflarından ayakkabı kumaşlarına kadar birçok alanda kullanılmaya başlamıştır [2]. Bununla beraber toplu taşımada kullanılan uçak ve arabalarda da kompozit yapıların kullanım oranı her geçen gün artmaktadır. Fakat uygulama alanlarında ve hizmet sırasında maruz kaldıkları yüklerden dolayı performansları düşmektedir [3]. Farklı alanlarda kullanılan bu yapılar çok farklı türde ve büyüklükte yüklere ve darbelere maruz kalabilmektedir. Bu yükler nedeniyle hasar alan yapının hizmet ömrü azalmaktadır. Buda hizmet sırasında büyük facialara ve büyük maliyet

Abstract

The aim of this study is to investigate the impact performance of arc-shaped cylindrical sandwich composite structures for different geometries of impactors and different impact angles using the finite element method. The effects of striker shape, striker angle, facesheet thickness and impact point on maximum contact force, absorbed energy efficiency, maximum displacement and damage deformation are investigated. Low velocity impact simulations were performed in the *LS DYNA* finite element program. At the end of the study, the contact force values at the P2 point supported by the core structure are higher than the P1 (core unsupported) point. As the impactor angle increased (from $\theta=30^\circ$ to 90°), the contact force value increased 2.6 times and the energy absorption efficiency value increased 1.65 times. The maximum contact value obtained with the cone impactor is 35.1% and 73.7% higher than the cylinder and sphere-tipped impactors, respectively, while the energy absorption efficiency value is 37.1% and 36.2% higher, respectively. For all three impactors, matrix damage was found to be the largest and dominant damage type.

Keywords: Cylindrical sandwich composite, Low velocity impact test, Progressive damage analysis, Finite element method, Cohesive Zone Model (CZM).

kayıplarına sebebiyet verebilmektedir. Dolayısıyla bu alanda çalışan araştırmacılar ve mühendisler kompozit yapıların maruz kalacağı darbe şeklini ve vurucu tipini iyi belirlemeli ve yapının buna göstereceği reaksiyonu öngörerek uygun malzeme seçimi ve yapı seçimi yapmalıdır [4].

Sandviç yapılar genel olarak çekirdek ve yüzey kapak yapıların bir araya gelmesiyle oluşan ve mühendislik alanında çokça kullanılan yapılardır [2]. Genellikle düz olarak üretilen bu yapılar teknolojik gelişmelere ve üretim tekniklerinin ilerlemesiyle beraber kavisli ya da silindirik olmak üzere birçok farklı şekilde de üretilebilmektedir. Uçakların uç kısmı ya da yeni nesil hafif bisiklet gövdeleri olmak üzere günlük hayatın birçok alanında farkında olmadan bile bu yapılar kullanılmaktadır.

Darbe yükü altında malzemelerin reaksiyonları farklı olabilir. Metal malzemeler darbeye maruz kaldıklarında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ilyasbozkurt02@gmail.com (İ. Bozkurt)
Geliş / Received: 17.09.2024 Kabul / Accepted: 22.10.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1551742

yapılarındaki lineerlikten ötürü malzeme davranışı tahmin edilebilmektedir. Fakat kompozit yapılarda malzemenin mikro mekanik yapısının karmaşıklığından ötürü bu tahmini yapmak daha zordur [5]. Çünkü bu yapılarda malzeme mukavemetini etkileyen fiber türü, matris türü, fiber ve matris oranı, fiber ve matris uyumu gibi birçok faktör bulunmaktadır. Bunların hepsinin malzeme mekaniğine bir oranda etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla bütün bu olasılıkları önceden tahmin etmek çok zordur. Bunun için araştırmacılar laboratuvar ortamlarında ya da sayısal analizler yardımıyla kompozit yapıların mekanik performansı hakkında araştırma yapmaktadırlar [6].

Kompozit yapıların üretimi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birçok özel makine ve cihazlar geliştirilmiştir. Yüksek maliyetli sarf malzeme kullanılarak üretilen kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirlerken birçok özel cihaz kullanılmak zorundadır. Laboratuvar imkânlarının kısıtlı olduğu ve finansal desteğin az olduğu kurumlarda araştırmacılar, bu alanda sağlıklı çalışmalar yapamamaktadırlar. Bu problemin üstesinden gelmek için araştırmacılar, sonlu elemanlar yöntemi ile kompozit yapıların mekanik davranışlarını inceleyebilmektedir. Bununla beraber bazı karmaşık ve zor deneyler bile yüksek doğruluk hassasiyetiyle sonlu elemanlar yöntemi ile uygulanabilmektedir [7-9].

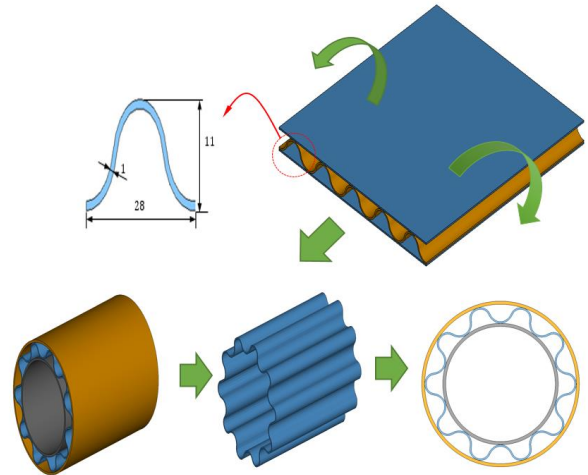
Darbe emme potansiyeli çok yüksek olan sandviç kompozit yapıların darbe altındaki davranışlarını inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır [10-20]. Rong vd., [20] oluklu çekirdeklerin geometrik konfigürasyon değişiminin darbe ve ezilme performansları üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Liu vd., [21] karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kapak ve alüminyum çekirdekli oluklu sandviç yapılarda vurucunun etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Düşük hızlı darbe testleri, konik, yarım küre ve düz çarpma tertibatları tarafından darbe direncini incelemek için gerçekleştirilmiştir. ABAQUS/Explicit'te Hashin kırılma kriterlerine ve Yeh delaminasyon kırılma kriterlerine dayanan aşamalı hasar modelini uygulamışlardır. Khalkhali vd., [22] farklı geometrik şekillere sahip vurucular ile darbelere maruz kalan sandviç plakanın doğrusal olmayan düşük hızlı darbe tepkisini incelemişlerdir. Küre, koni ve silindirik şekilli olmak üzere üç farklı vurucu ucu kullanarak darbe testlerini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. He vd., [23], karbon fiberle güçlendirilmiş polimer yüzey tabakaları ve alüminyum alaşımlı oluklu çekirdeklerden oluşan hibrit sandviç yapıların düşük hızlı darbe davranışını ve darbe sonrası eğilme davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Li vd., [24] kirigami oluklu çekirdekli sandviç yapıların sarkaç darbe testleri yoluyla dinamik ezilme altındaki performansını ve enerji emilimini incelemişlerdir. Yang vd., [25] sıcak pres kalıplama yöntemiyle üretilen karbon fiber kompozit dairesel oluklu sandviç silindirik panel darbe dayanımını ve hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışmada relative yoğunluğun, darbe enerjisinin ve darbe konumunun darbe tepkileri üzerindeki etkilerini incelemek için Hashin hasar kriterlerine dayanan doğrulanmış sonlu elemanlar analizi modellerini kullanmışlardır. Cheng vd., [26] U-tipi oluklu sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını deneysel

ve sayısal olarak incelemişlerdir. Boonkong vd., [27] eğrisel alüminyum alaşım çekirdekli hafif alüminyum sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışı, enerji soğurma performansı ve hasar mekanizmalarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yellur vd., [28] polipropilen petek sandviç yapılarında üst ve alt yüzey levha kalınlıklarının darbe davranışı üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal analiz için LS-DYNA sonlu eleman modelini kullanmışlardır.

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak yay çekirdekli silindirik sandviç CFRP kompozit yapının darbe performansları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada vurucu şeklinin, vurucu açısının, yüzey kalınlığının ve darbe noktasının maksimum temas kuvveti, absorbe enerji verimliliği, maksimum yer değiştirme ve hasar deformasyonu üzerine etkileri detaylıca araştırılmıştır. Düşük hızlı simülasyonları için LS DYNA sonlu elemanlar programında MAT 54 malzeme modeli kullanılarak Hashin hasar kriterine dayalı olarak ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Vurucu tipi olarak literatürde en çok kullanılan silindir, koni ve küre uçlu vurucular kullanılmıştır. Bununla beraber ilerlemeli hasar analizi ile kritik noktadaki deformasyonlar gösterilmiştir. Aynı standartlara sahip vurucuların etkileri mukayese edilmiştir.

2 Materyal ve metod

Yay çekirdekli silindirik sandviç yapının ölçü detayları ve üretim aşamaları Şekil 1'de verilmiştir. Ölçüleri verilen sandviç yapıya farklı geometriye vurucular ile darbe testleri uygulanmıştır. Bununla beraber darbe açısının darbe performansı üzerindeki etkileri de ayrıca incelenmiştir.



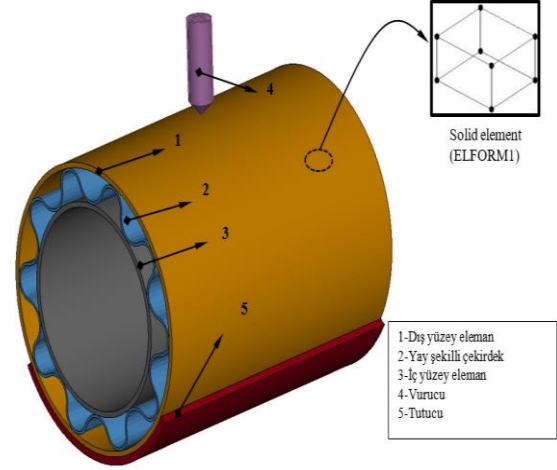
Şekil 1. Numune ölçüleri.

Düz bir plaka olarak çizilen numuneler Solidworks 'te Flex komutu ile bükülerek silindir haline getirilmiştir (Şekil 1). Çap x uzunluk ölçüleri 100 x 140 mm olan bu yapıda kalınlıkları 2 mm ve 4 mm iki farklı yüzey kapaklar kullanılarak darbe performansları ayrıca incelenmiştir. Düşük hızlı darbe simülasyonu Şekil 2'deki gibi modellenmiştir. Tüm darbe testleri numunelerin merkezine uygulanmıştır. Alt tutucu sabit olarak belirlenmiştir. Vurucu

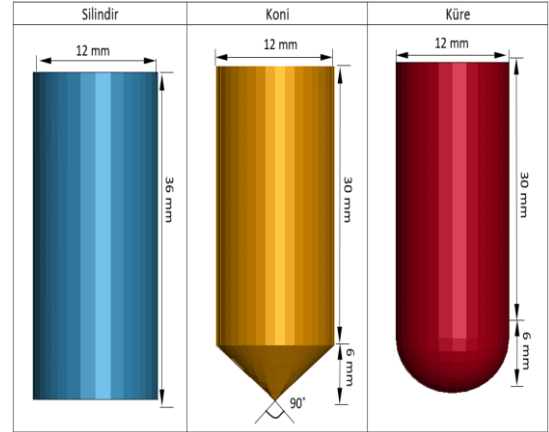
x ve y yönlerindeki yer değiştirmelerle sınırlandırılmış ve yalnızca vurucu yönünde (z eksen) hareket edebilmektedir. Her ne kadar *Shell* eleman ile yapılan analizlerin çalışma süresi az olsa da hasar yapılarını daha net ve deneysel hasarlara yakın göstermek için sekiz düğümlü katı eleman (*solid*) (*ELFORM1*) kullanılmıştır. Bu eleman yapısı çalışmada kullanılan vurucular Şekil 3'te verilmiştir. Vurucu uçları belirlenirken literatürde kullanılan küre vurucu ucu referans alınmıştır [29]. Vurucu etkisi incelendiği için koni ve silindirik vurucularının da aynı ölçülerde olmasına dikkat edilmiştir. Ağ yapısı için 1x1 mm, 2x2 mm ve 3x3 mm ağ yakınsama çalışması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan eleman sayısı ve işlem süresi göz önüne alınarak 2 x 2 mm ağ eleman boyutu seçilmiştir. Burada sadece sayısal simülasyon yapıldığı için ve ayrıca tüm sınır şartları ve yükleme durumları eşit olduğu için darbe simülasyonu her üç vurucu için eşit şartlarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma ile desteklenen bir çalışma olması durumunda mesh yakınsama yapılarak en uygun mesh tercihi yapılabilirdi [29]. Toplamda 30197 düğüm ve 26750 katı eleman kullanılmıştır. Vurucu ve silindirik sandviç yapı arasında teması tanımlamak için CONTACT ERODING SURFACE TO SURFACE temas kartı kullanılmıştır. Darbe esnasında tutucular arasındaki numunenin hareket etmemesi ve tutucu tarafından sabit tutulması için CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE temas kartı kullanılmıştır. Buradaki statik ve dinamik sürtünme katsayıları ise sırayla 0.2 ve 0.3 olarak girilmiştir [8].

Çalışmada kullanılan çekirdek yapısı korrige (*corrugated*) yapıda olduğu için numunenin her yerinde aynı şekilde temas etmemektedir. Dolayısıyla vurucunun uygulandığı bazı noktalarda çekirdek desteği var iken bazı yerlerde aynı şekilde temas etmemektedir. Dolayısıyla vurucunun uygulandığı bazı noktalarda çekirdek desteği bulunmamaktadır. Çalışmada iki farklı noktada darbe testleri uygulanmıştır. Darbe noktaları Şekil 4'te verilmiştir. Bu noktaların darbe performansları ayrıca mukayese edilmiştir. Bu çalışmada yapıstırıcı malzeme olarak kullanılan *Araldite*

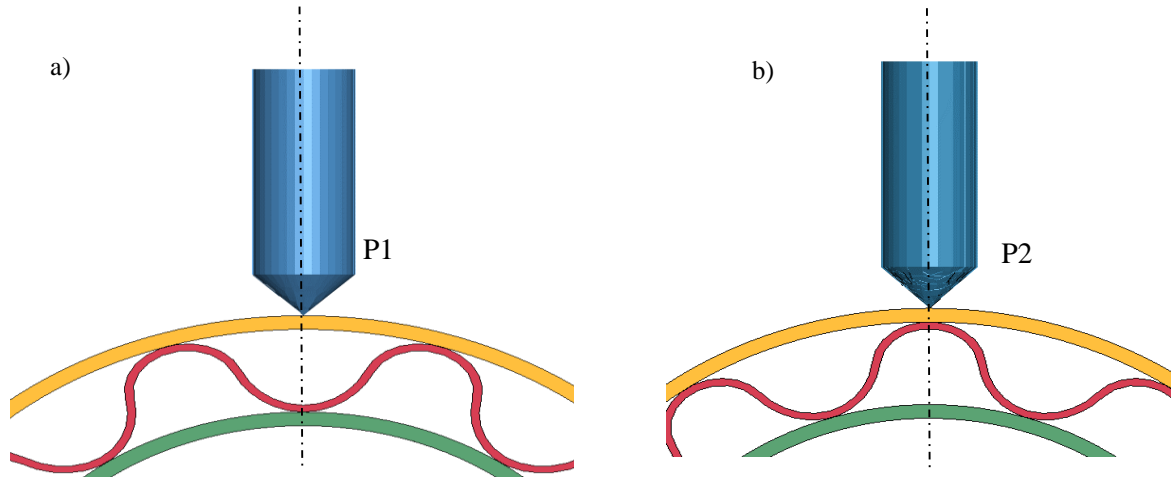
2015'in temas parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan CFRP malzemenin mekanik özellikleri ve hasar parametreleri sırayla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Düşük hızlı darbe testinin sonlu elemanlar modeli.



Şekil 3. Vurucu ölçüleri.



Şekil 4. a)Yay temassız darbe noktası, b)Yay temaslı darbe noktası.

Tablo 1. Çekirdek ve yüzey levhaları arasındaki delaminasyonun kohezyon parametreleri [12].

Sembol	Tanım	Değer	Birim
<i>NFLS</i>	Normal yönde maksimum çekme gerilmesi	21.63x10 ⁹	Pa
<i>SFLS</i>	Teğetsel yönde maksimum çekme gerilmesi	17.9x10 ¹⁰	Pa
<i>PARAM</i>	Karışık mod kriteri için üs	1	-
<i>ERATEN</i>	Mod I için kritik enerji yayılım hızı	430	N/m
<i>ERATES</i>	Mod II için kritik enerji yayılım hızı	4700	N/m
<i>CT2CN</i>	Teğetsel sertliğin normal sertliğe oranı	1	-
<i>CN</i>	Normal sertlik	8080	Pa/m

Tablo 2. CFRP kompozit malzemenin mekanik özellikleri [8].

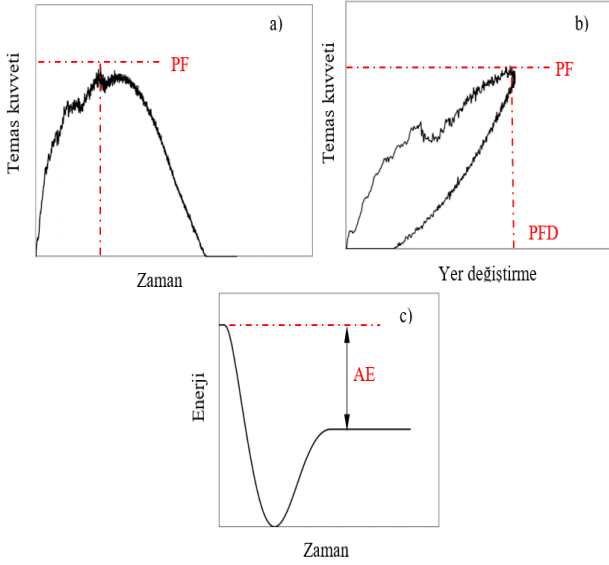
Sembol	Özellik	Değer
ρ (kg/m ³)	Yoğunluk	1500
E_a, E_b (GPa)	a ve b doğrultularındaki elastisite modülleri	43.7
E_c (GPa)	c doğrultusundaki elastisite modülü	14.57
ν_{ab} (-)	$a - b$ düzlemi için poisson oranı	0.21
ν_{bc} (-)	$b - c$ düzlemi için poisson oranı	0.21
ν_{ca} (-)	$c - a$ düzlemi için poisson oranı	0.21
G_{ab} (GPa)	$a - b$ düzlemi için kayma modülü	14.18
G_{bc} (GPa)	$b - c$ düzlemi için kayma modülü	14.65
G_{ca} (GPa)	$c - a$ düzlemi için kayma modülü	14.65
S_{aT} (GPa)	a doğrultusundaki çekme dayanımı	0.589
S_{aC} (GPa)	a doğrultusundaki basma dayanımı	0.1096
S_{bT} (GPa)	b doğrultusundaki çekme dayanımı	0.859
S_{bC} (GPa)	b doğrultusundaki basma dayanımı	0.1096
S_{ab} (GPa)	$a - b$ düzlemi için matris modu kayma dayanımı	0.1082

Tablo 3. CFRP kompozit malzemenin hasar parametreleri [30].

Sembol	Özellik	Değer
<i>DFAILM</i>	Çekme ve basınçta matris gerilmesi için maksimum gerilme	0.0
<i>DFAILS</i>	Maksimum kayma gerilmesi	0.0
<i>DFAILT</i>	Fiber gerilmesi için maksimum çekme	0.0
<i>DFAILC</i>	Fiber gerilmesi için maksimum basma	0.0
<i>TFAIL</i>	Eleman silinmesi için zaman adımı boyutu kriterleri	0.16
<i>Alpha</i>	Kayma gerilmesi (doğrusal olmayan terimi)	0.0
<i>Soft</i>	Ezilmede mukavemeti azaltan parametre	0.7
<i>FBRT</i>	Matris hasarında sonra fiber çekme mukavemeti için yumuşama faktörü	1
<i>YCFAC</i>	Matris hasarında sonra fiber basma mukavemeti için yumuşama faktörü	3
<i>EFS</i>	Efektif hasar gerilmesi	0.90

3 Bulgular ve tartışma

Malzemenin darbe yükü altındaki davranışın belirlenmesi için genellikle düşük hızlı darbe testleri uygulanır. Bu testler sayesinde malzemenin mekanik performansı hakkında bilgiler elde edilir. Darbe testi sonucu elde edilen grafikler Şekil 5'te verilmiştir. Bu sonuçlar malzeme mekaniği hakkında araştırmacılar için önemli bilgiler içerir. Örneğin Şekil 5a' da temas kuvveti-zaman grafiğinde vurucu numuneye temas ettikten sonra kuvvet maksimum noktaya çıkmış sonrada geri dönmüştür. Tepe noktasında dalgalanmalar meydana gelmiştir burada temas ettiği noktadaki katmanlarda hasarlar meydana geldiğinden ötürü kuvvet değerinde değişimler meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonunda temas kuvvet değeri vurucunun ucundan okunmaktadır. Vurucunun temas ettiği noktadaki elemanlar üzerinde gerilme yığılması (stress intensity) meydana gelir. Malzemenin mekanik özelliğine göre belirli kritik değerden sonra bu elemanlar silinir [31]. Silinen elemanlarda vurucu ile teması kesilir. Tam bu anda kuvvet değerinde düşüş meydana gelir. Vurucunun enerjisi numune tarafında absorbe edildikten sonra geri döner. Bu geri dönüşü Şekil 5b'de vurucunun yer değiştirme hareketlerinden de görülebilmektedir. Şekil 5c'de ise vurucunun baştaki enerjisi ile sonda enerjisi arasındaki farkın absorbe enerji (AE) değeri gösterilmiştir. Vurucu numune yüzeyinden geri sekmıştır. Çünkü temas kesildikten sonra belirli bir hızda enerjisine devam etmektedir. Bu grafikler ile darbe senaryosunda yaşanan mekanik durumları değerlendirerek uygun malzeme ve yapı seçimi yapılabilir.



Şekil 5. Darbe yükü altındaki kompozit boruların a) Temas kuvveti-zaman, b) Temas kuvveti-yer değiştirme ve c) Enerji-zaman grafikleri.

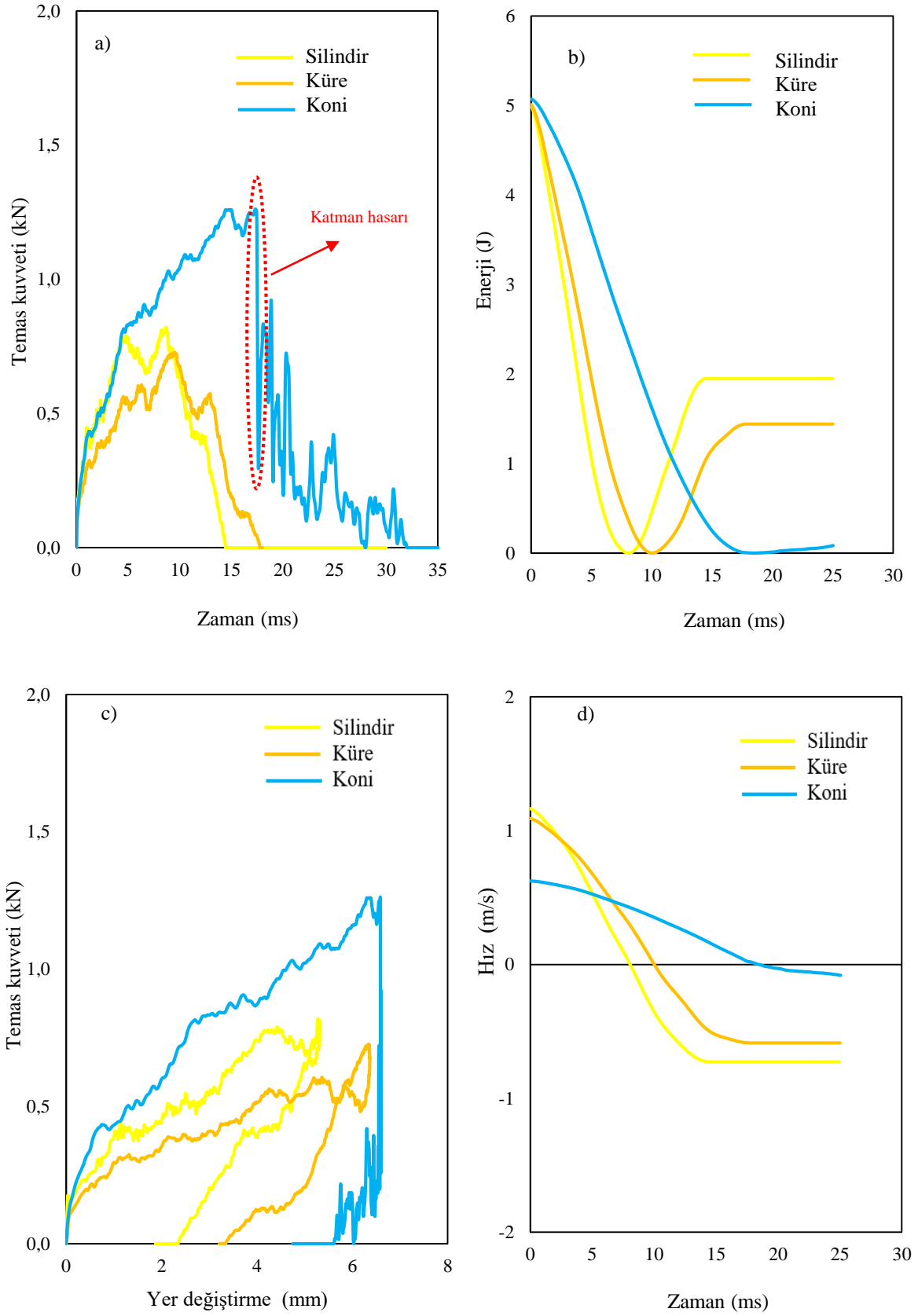
Yay şekilli çekirdek yapı silindirik sandviç yapıya ait farklı vurucular için temas kuvveti-zaman, absorbe enerji-zaman, temas kuvveti-yer değiştirme ve hız-zaman grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Buradaki darbe testi P1 noktasına uygulanmıştır. Şekil 6a'da temas kuvveti-zaman grafiğindeki vurucunun numune yüzeyine temas etmesi sebebiyle kuvvet maksimum noktaya ulaşır ve daha sonra enerji boşalmasıyla tekrar sıfır noktasına geri döner. Her üç vurucu için aynı senaryo gerçekleşmiştir. Çalışmada vurucu ucun etkisini daha iyi göstermek için 5 J darbe enerjisi ile silindirik, konik ve küresel uçlu vurucular ile darbe simülasyonu uygulanmıştır. Silindir, koni ve küre uçlu vurucu için maksimum temas kuvvetleri sırayla 0.82, 1.26 ve 0.3 kN'dur. Buna göre bu üç vurucu arasında maksimum temas değeri en yüksek koni vurucuda elde edilmiştir [21]. Yani koni uçlu bir vurucu ile darbeye maruz kaldığındaki dayanımı diğer vuruculara göre daha fazla olduğu anlamına gelir. Maksimum değerden sonra dikkat edilirse grafiklerde düşüş meydana gelmiştir. Grafik detaylıca incelendiğinde silindir ve küre uçlu vurucular ile yapılan darbelerde kuvvetin maksimum noktaya ufak dalgalanmalar ile çıkıp indiği belirlenmiştir. Fakat koni vurucuda ise kuvvet bir noktaya kadar çıkmış sonra sert bir şekilde düşmüştür. Burada üst katmanda hasarın meydana geldiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu kuvvetin düştüğü andaki vurucunun temas ettiği nokta grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 6b'de enerji-zaman grafiğindeki her üç vurucu içinde başlangıç enerjisi 5 J'dür. Fakat darbe sonu silindir, koni ve küre uçlu vurucu için geriye kalan enerjileri sırayla 1.95 J, 0.15 J ve 1.44 J'dür. Enerji absorbe verimliliği bu enerji farkını (son enerji-ilk enerji) başlangıç enerjisine bölerek hesaplanır. Dolayısıyla silindir, koni ve küre uçlu vurucu için enerji absorbe verimliliği (η) sırayla 0.61, 0.97 ve 0.71'dir. En fazla enerji absorbesi koni uçlu vurucu ile yapılan darbe simülasyonunda elde edilmiştir. Şekil 6c'de temas kuvveti-yer değiştirme grafiğinde yer değiştirmeler incelendiğinde silindir, koni ve

küre uçlu vurucu için sırayla 8.95, 6.62 ve 6.38 mm yer değiştirme meydana gelmiştir. Şekil 6d'de ise hız-zaman grafiğindeki değişimler verilmiştir. Grafik incelendiğinde hızın sıfır değerine indiği daha sonra da negatif yönde hareket ettiği görülmektedir. Burada vurucu temas ettikten sonra hızının sıfıra kadar düştüğü daha sonra tam ters yönde hareket ettiğini gösterir. Şekil 7'de ise P2 noktası için benzer grafikler verilmiştir. Şekil 7a'da temas kuvveti-zaman grafiğinde kuvvet maksimum noktaya salınım olmadan çıkıp inmiştir. Dolayısıyla burada yani P2 noktasında P1 noktası gibi büyük oranda deformasyonun meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni ise bu noktanın çekirdek yapısı tarafından desteklenmesidir [32]. Şekil 7b'de enerji-zaman grafiğinde son çıkış enerji değerlerinin başlangıç enerji değerlerine yakın olduğu görülmektedir.

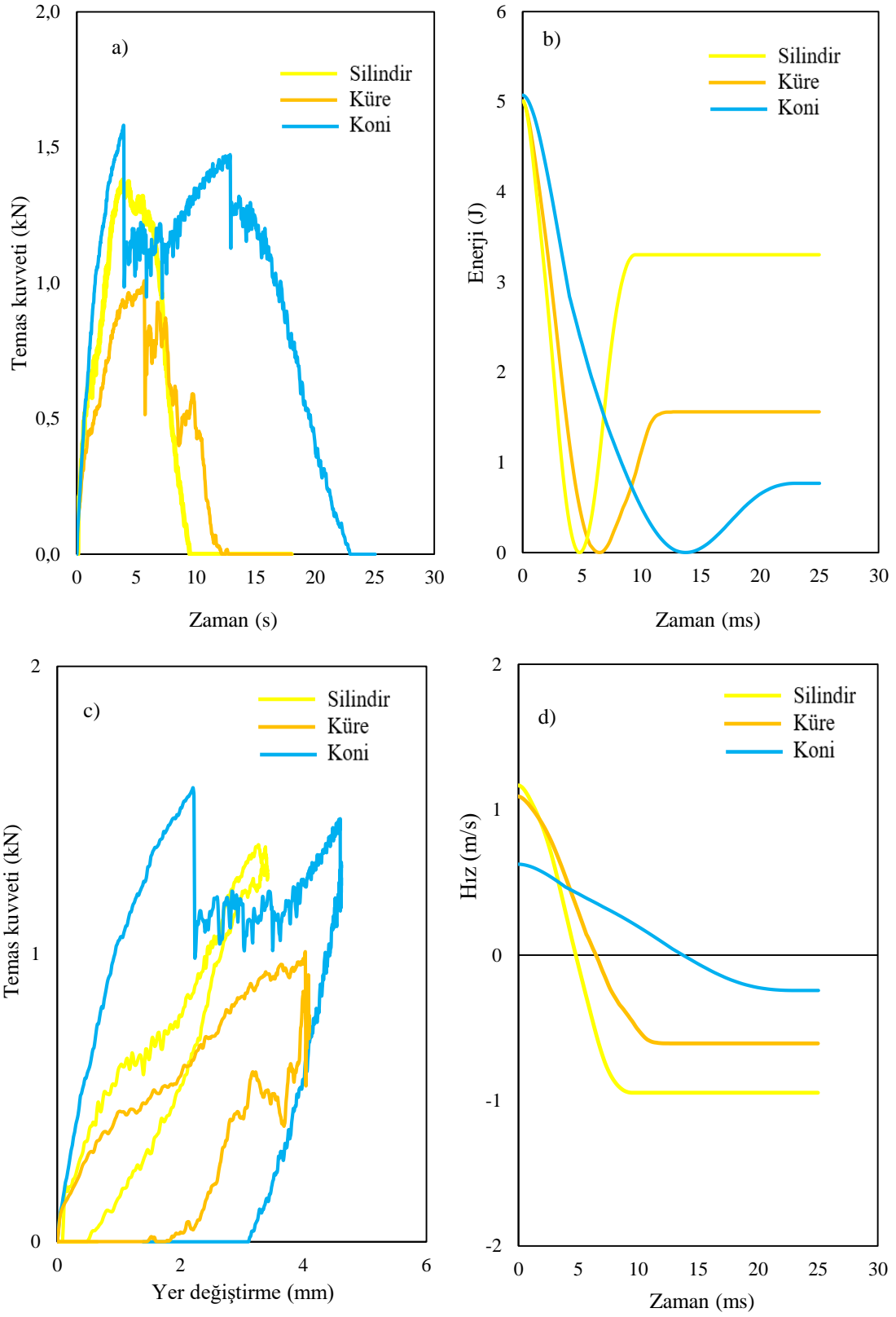
Dolayısıyla P1 den daha az enerji absorbe değeri olduğu belirlenmiştir. Şekil 7c'de temas kuvveti-yer değiştirme grafiğinde kuvvet maksimum noktaya çıkıp tekrar geri döndüğü burada daha açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 7d'de ise hız-zaman grafiğindeki değişimleri benzerdir.

Şekil 8'de ise yay şekilli sandviç yapının farklı vurucular altında maksimum temas ve enerji absorbe verimlilik değerleri verilmiştir. Şekil 8a'da P1 darbe noktası için koni vurucu 1,26 kN ile maksimum temas değeri en yüksektir. En yüksek enerji absorbe verimlilik değeri de yine koni vurucu ile elde edilmiştir. Şekil 8b'de P2 darbe noktası için aynı şekilde koni vurucu 1.58 kN ile en yüksek temas kuvveti değerine sahiptir. En yüksek enerji absorbe verimlilik değeri ise 0.92 ile yani % 92 ile koni uçlu vurucuda elde edilmiştir. Şekil 9'da yüzey kapak kalınlığı $t=4$ mm için farklı vurucular altında maksimum temas ve enerji absorbe verimlilik değeri verilmiştir. Yüzey kapak t kalınlığı 2 mm den 4 mm çıkarıldığında her üç numune için maksimum temas kuvvetinin arttığı görülmüştür [33]. Buna karşın enerji absorbe değeri de azalmıştır. En yüksek maksimum temas kuvveti değeri ve enerji absorbe verimlilik değeri yine koni vurucu ile elde edilmiştir.

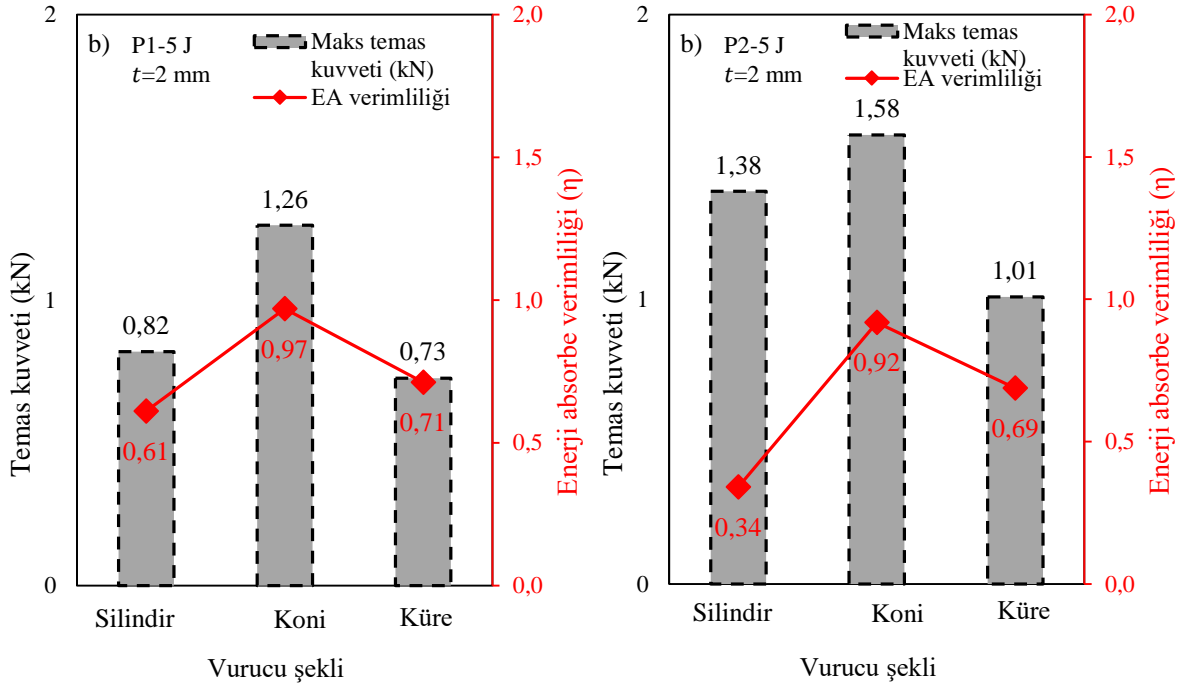
Tablo 4 ve Tablo 5'te farklı darbe noktaları için (P1 ve P2) Fiber çekme modu, Fiber basma modu, Matris çekme modu ve Matris basma modu hasarları ayrı ayrı gösterilmiştir. Farklı vurucular için 5 J darbe için meydana gelen hasarlar mukayese edilmiştir. Burada kırmızı renk ile gösterilen bölgeler hasarlı bölgeler, mavi ile gösterilen bölgeler ise hasarın meydana gelmediği alanları temsil etmektedir [33]. İlk olarak P1 noktasında çekirdek tarafından desteklenmediği için meydana gelen deformasyonun büyük olduğu görülmektedir [21]. Bununla beraber hasarın etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı belirlenmiştir. Bu etki grafik yapılarında büyük dalgalanmalara sebebiyet verdiği önceki bölümde değinilmiştir. P2 noktasında ise çekirdek yapı tarafından desteklendiği için hasar daha stabil ve P1'e göre lokal kalmıştır [8]. Koni vurucunun daha yıkıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Burada çekirdek yapısının darbeye karşı çok önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır [2]. Bununla beraber matris hasarının en baskın hasar tipi olduğu görülmektedir.



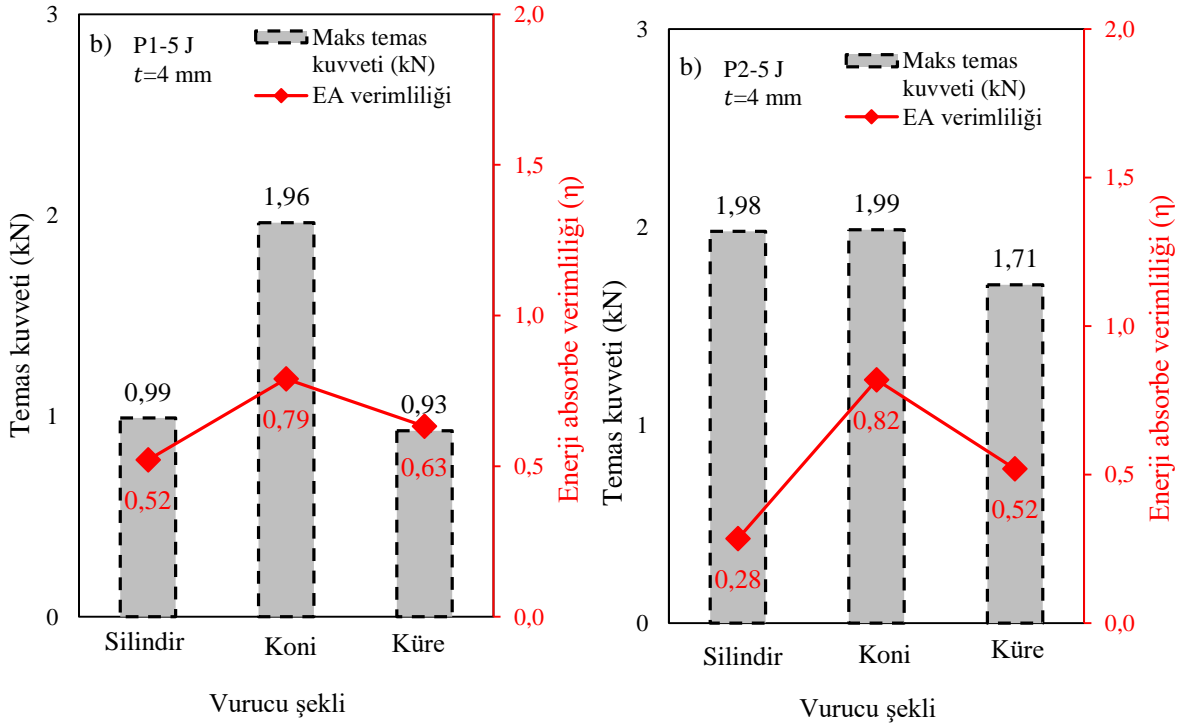
Şekil 6. Vurucu geometrisinin a) Temas kuvveti-zaman, b) Enerji-zaman, c) Temas kuvveti-Yer değiştirme ve d) Hız-zaman grafikleri üzerindeki etkisi (P1).



Şekil 7. Vurucu geometrisinin a) Temas kuvveti-zaman, b) Enerji-zaman, c) Temas kuvveti-Yer değiştirme ve d) Hız-zaman grafikleri üzerindeki etkisi (P2).

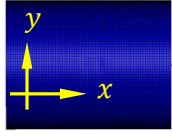
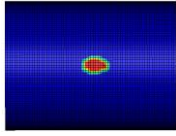
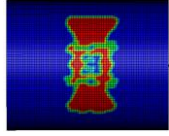
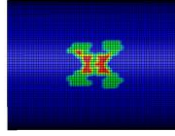
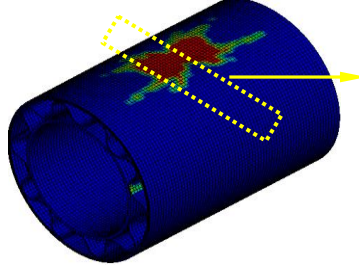
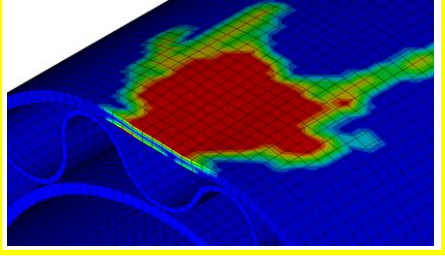
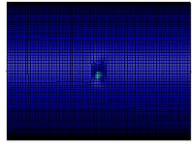
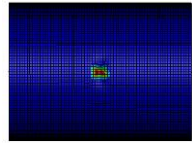
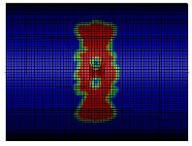
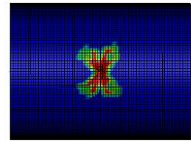
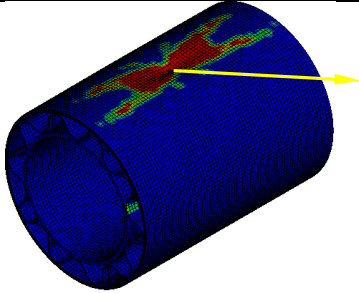
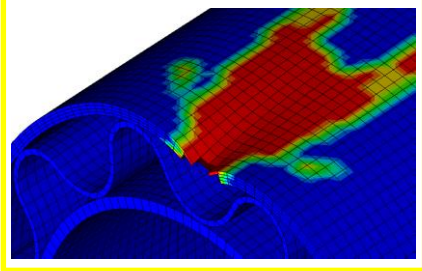
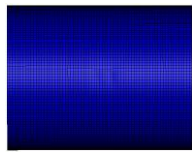
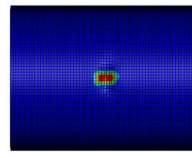
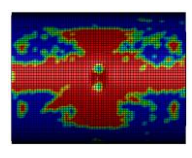
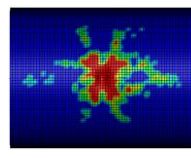
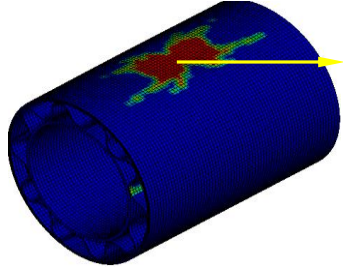
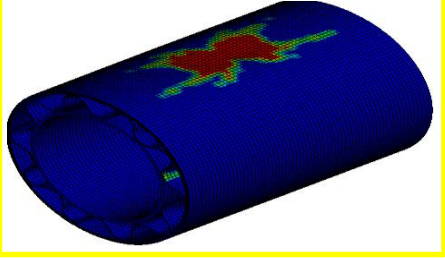


Şekil 8. a) P1, b) P2 darbe noktaları için temas kuvvetinin ve enerji absorbe verimlilik değerinin değişimi (Yüzey kapak kalınlığı $t=2$ mm).

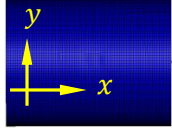
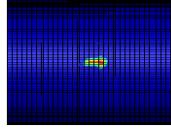
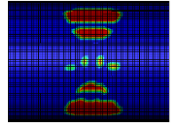
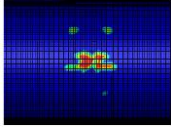
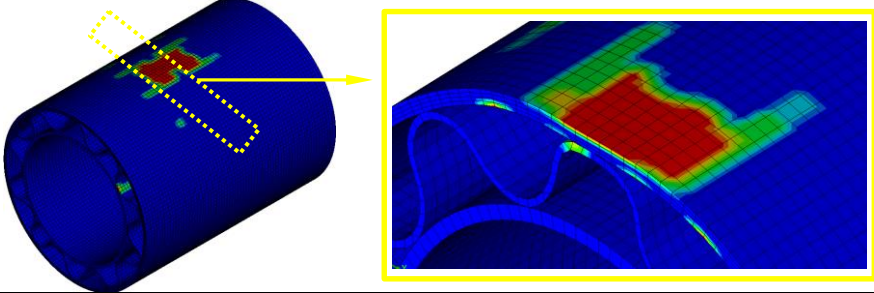
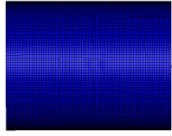
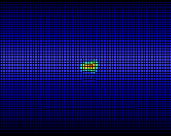
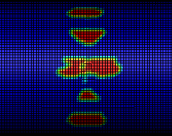
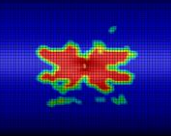
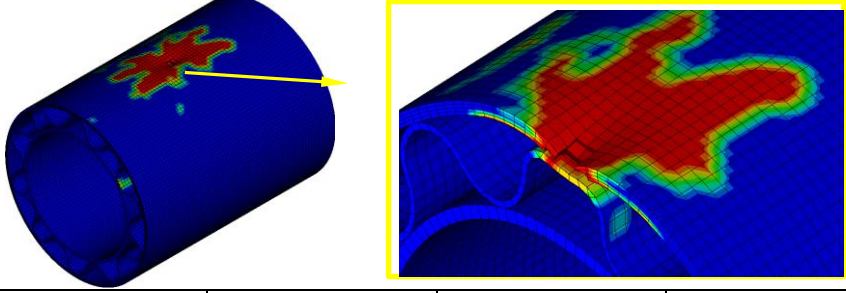
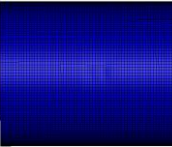
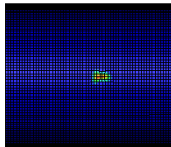
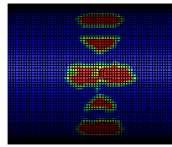
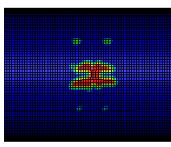
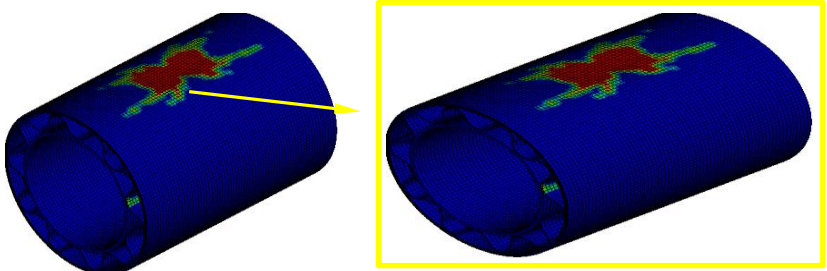


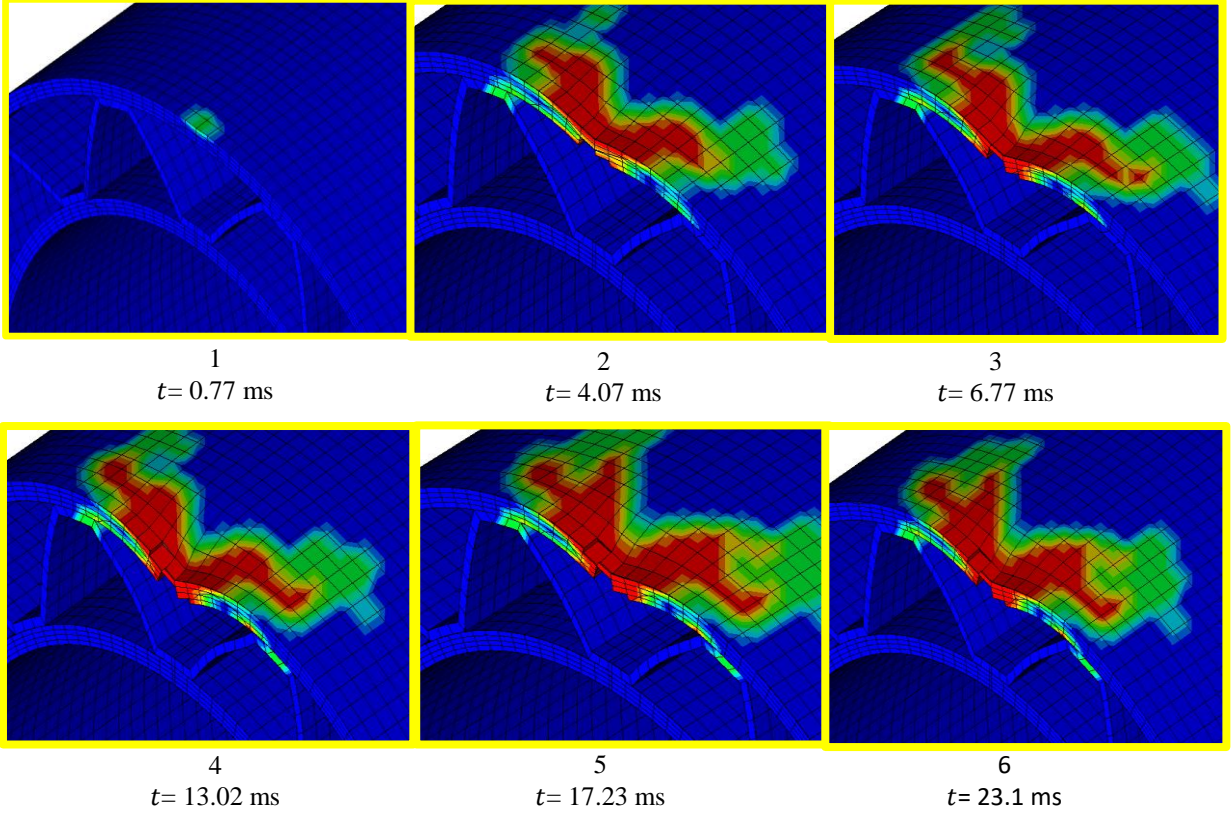
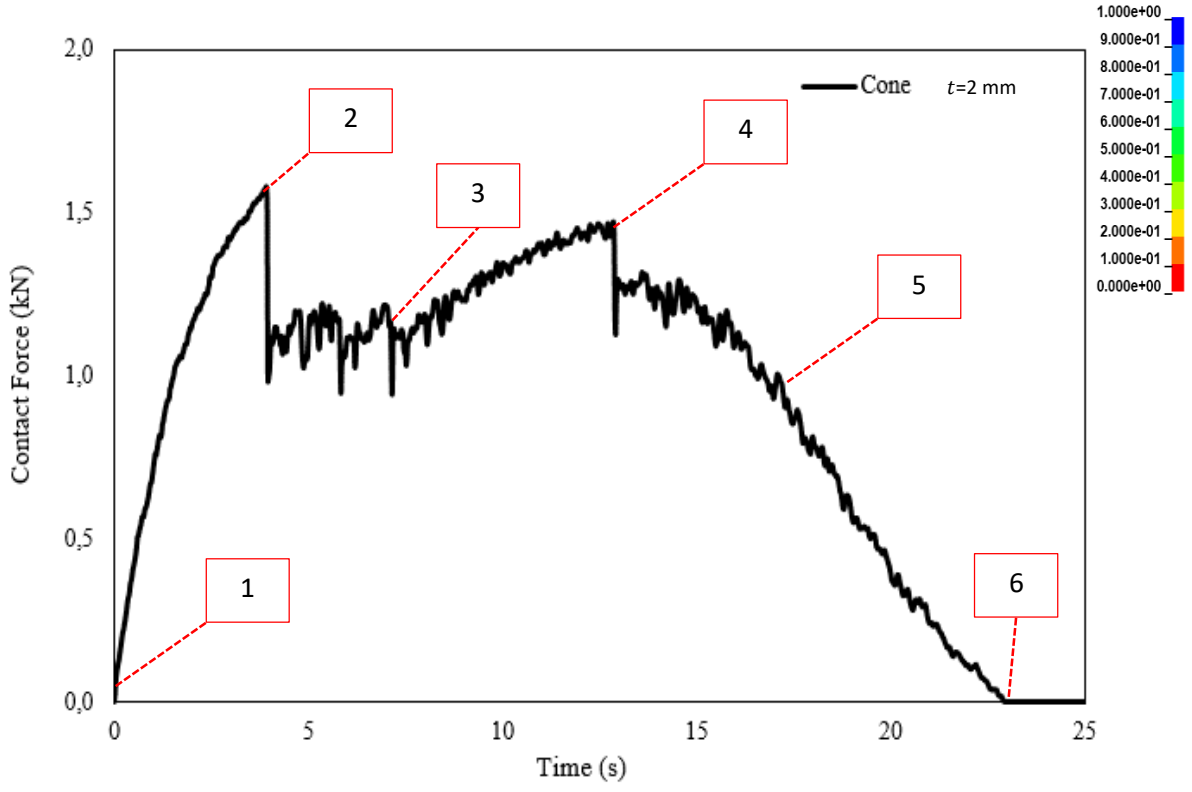
Şekil 9. a) P1, b) P2 darbe noktaları için temas kuvvetinin ve enerji absorbe verimlilik değerinin değişimi (Yüzey kapak kalınlığı $t=4$ mm).

Tablo 4. Farklı vurucular ile yapılan darbe için deformasyonlar (P1).

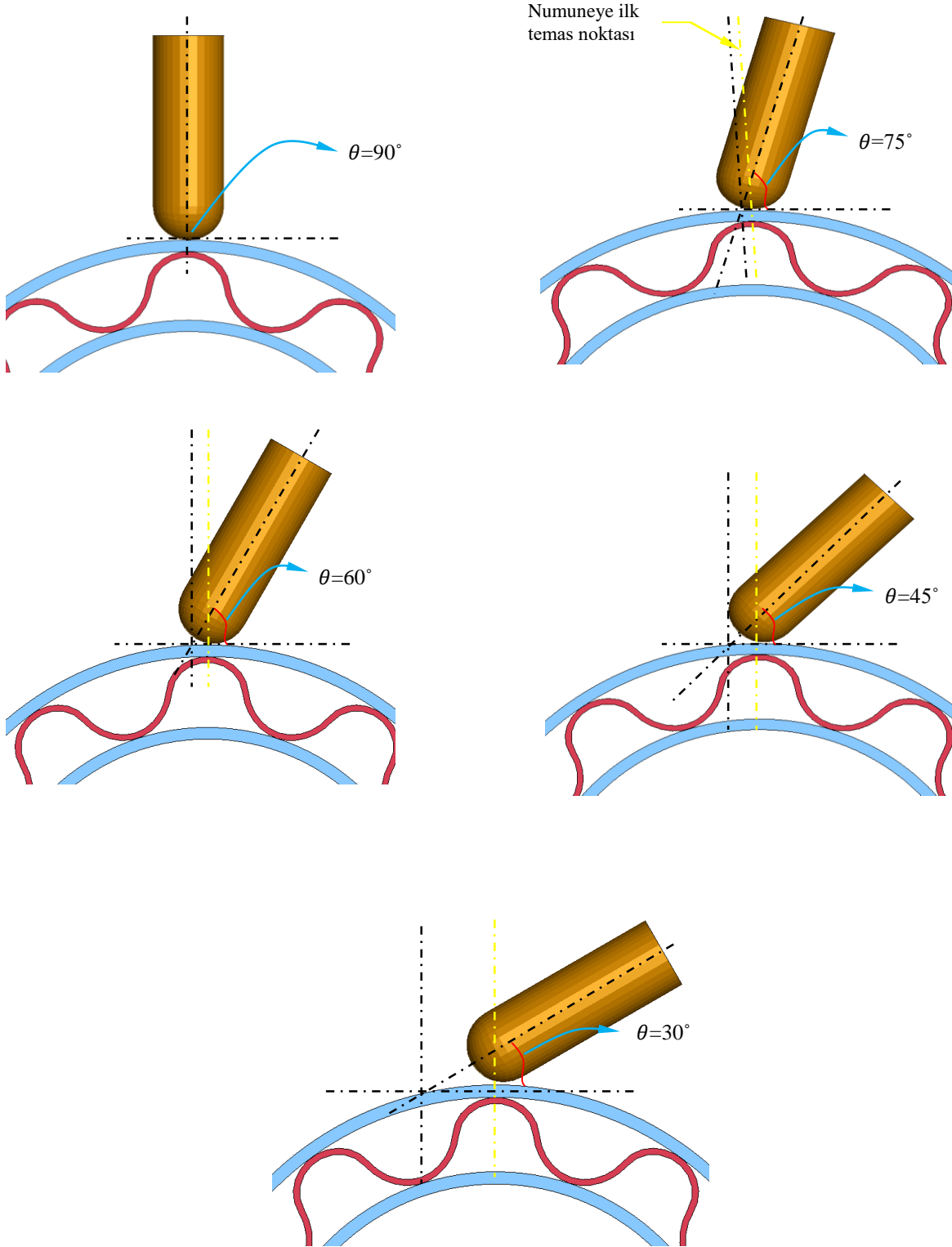
E (J)		Fiber çekme modu	Fiber basma modu	Matris çekme modu	Matris basma modu
Silindir, 5 J	Üst yüzey				
	İzometrik				
Koni	Üst yüzey				
	İzometrik				
Küre	Üst yüzey				
	İzometrik				

Tablo 5. Farklı vurucular ile yapılan darbe için deformasyonlar (P2).

E (J)		Fiber çekme modu	Fiber basma modu	Matris çekme modu	Matris basma modu
Silindir, 5 J	Üst yüzey				
	İzometrik				
Koni	Üst yüzey				
	İzometrik				
Küre	Üst yüzey				
	İzometrik				



Şekil 10. Koni uçlu vurucu ile darbe sonucu meydana gelen deformasyonlar (P1).

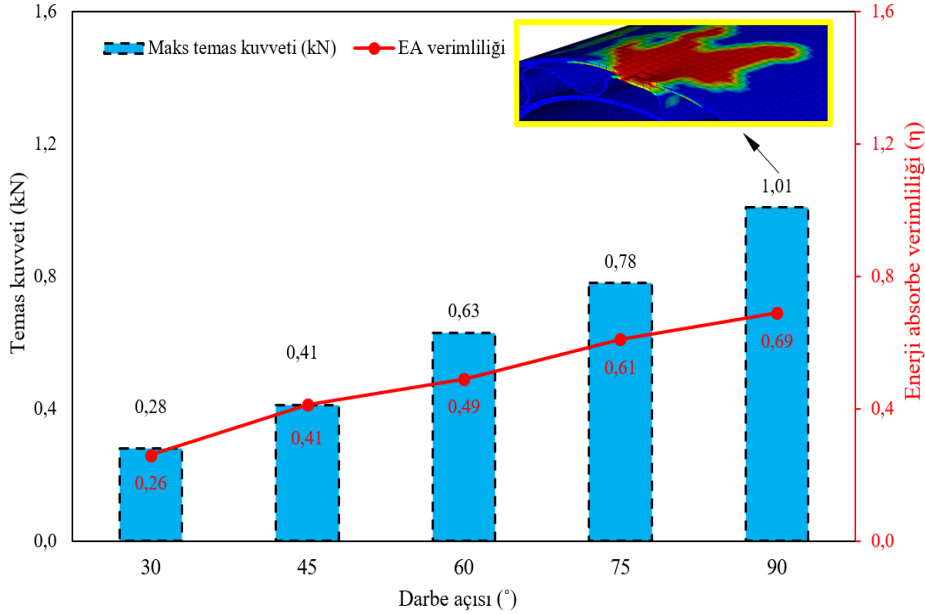


Şekil 11. Farklı darbe açıları için sonlu elemanlar modeli.

Sonlu elemanlar yönteminin bize sunduğu en önemli kolaylıklardan bir tanesi de darbe simülasyonu boyunca istenilen noktadaki deformasyonları görebilmektir [34]. Şekil 10’da koni uçlu vurucu için P1 noktasında yapılan darbe sonucu elde edilen temas kuvveti-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde vurucunun numuneye temasıyla beraber kuvvet değeri maksimum noktaya artmıştır. Daha sonra burada kuvvet değerinde keskin bir düşüş meydana gelmiştir. Kuvvet dalgalı olarak devam ederken ikinci sert düşüş meydana gelmiştir. Son kısımda kuvvet değerinin belirli salınımlar ve dalgalı hareketler yaparak sıfır noktasına geldiği görülmektedir. Genel olarak grafik incelendiğinde koni ucunun yıkıcı etkisi nedeniyle diğer grafiklerden daha dalgalı ve salınımlı temas kuvveti eğrisi elde edilmiştir [35].

Kuvvet arttıkça hasar alanı yani kırmızı bölgenin alanı artmıştır (Aşama 3). Kuvvet ve dolayısıyla gerilmelerden kaynaklı elemanlar silindiği için temas kuvveti değerinde keskin düşüş yaşanmıştır (Aşama 4). Vurucu teması keserken temas alanında hasarların son hali grafikte verilmiştir (Aşama 5-6).

Daha önce yapılan simülasyonlarda $\theta=90^\circ$ olarak yani numune yüzeyine dik olarak darbe testleri uygulandı.



Şekil 12. Darbe açısının temas kuvveti ve enerji absorbe verimlilik değeri üzerindeki etkisi (η).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı geometriye sahip vurucular ile yay çekirdekli silindirik sandviç yapının darbe performansı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada vurucu şeklinin, vurucu açısının, yüzey kapak kalınlığının ve darbe noktasının maksimum temas kuvveti, absorbe enerji verimliliği, maksimum yer değiştirme ve hasar deformasyonu üzerine etkileri incelenmiştir. Düşük hızlı simülasyonları için LS DYNA sonlu elemanlar programında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Genel olarak P2 noktasında (çekirdek destekli) temas kuvvet değerleri P1 (çekirdek desteksiz) 'den

Çalışmada darbe açısının etkileri göstermek için ise Şekil 11’de verilen küre uçlu vurucu ile $\theta=90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ darbe açıları ve 5 J ile darbe testleri uygulanmıştır. Açılı darbe simülasyonları yaklaşık paralel sonuçlar vereceği için koni ve silindir uçlu vurucular için ayrı simülasyonlar yapılmamıştır.

Çalışmada kullanılan numune silindirik yapıya sahip olduğu için açılı darbe durumunda istenilen noktaya temas etmek için referans noktasına ihtiyaç vardır. Sarı renk ile gösterilen çizgi vurucunun numuneye ilk temas ettiği noktayı temsil etmektedir [36]. Darbe simülasyonu sonucu elde edilen enerji absorbe verimlilik değerleri Şekil 12’de verilmiştir.

Grafik incelendiğinde darbe açısı $\theta=30^\circ$ ’den 90° ’ye doğru arttıkça temas kuvvet değeri 2.6 kat artmıştır. Bununla beraber enerji absorbe verimlilik değeri de 1.65 kat artmıştır. Açılı darbe durumunda vurucunun enerjisinin tamamını boşaltmadığı dolayısıyla numunede enerji absorbesi meydana gelmediği belirlenmiştir.

yüksektir. Çekirdek desteği temas kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

- Koni vurucu ile elde edilen maksimum temas değeri silindir ve küre uçlu vurucuya göre sırasıyla %35.1 ve %73.7 daha yüksek iken enerji absorbe verimlilik değeri ise sırasıyla %37.1 ve %36.2 daha yüksektir. Vurucunun numune ile temas alanı küçük ve yıkıcı olduğundan kaynaklanmaktadır.
- Darbe sonucu en büyük yer değiştirme koni vurucu ile meydana gelmiştir.
- Vurucu geometrisinin enerji emme verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

- Vurucu açısı artıkça ($\theta=30^\circ$ 'den 90° 'ye) temas kuvvet değeri 2.6 kat, enerji absorbe verimlilik değeri de 1.65 kat artmıştır.
- Her üç vurucu için en büyük ve baskın hasar tipinin matris hasarı olduğu belirlenmiştir.
- Yapılan bu çalışma ileriki araştırmalarda deneysel çalışma ile de desteklenirse literatüre büyük katkı sağlayacak potansiyele sahiptir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] V. Crupi, E. Kara, G. Epasto, E. Guglielmino, and H. Aykul, Prediction model for the impact response of glass fibre reinforced aluminium foam sandwiches. *Int J Impact Eng*, vol. 77, pp. 97–107, 2015, doi: [10.1016/j.ijimpeng.2014.11.012](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.11.012).
- [2] M. O. Kaman, M. Y. Solmaz, and K. Turan, Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels. *J Compos Mater*, vol. 44, no. 24, pp. 2819–2831, 2010, doi: [10.1177/0021998310371541](https://doi.org/10.1177/0021998310371541).
- [3] A. I. Ayten, Y. Polat, M. Sahbaz, and A. Seyhan, Effect of solution-blown nanofibrous web on quasi-static punch shear test results and quasi-static indentation behavior of carbon fiber-reinforced epoxy matrix composites. *J Compos Mater*, vol. 57, no. 24, pp. 3865–3875, Aug. 2023, doi: [10.1177/00219983231197351](https://doi.org/10.1177/00219983231197351).
- [4] A. İ. Ayten, Investigation of mechanical properties and damage types of E-glass fiber reinforced epoxy matrix composites under various loadings. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 185–190, 2023, doi: [10.35860/iaej.1334883](https://doi.org/10.35860/iaej.1334883).
- [5] Z. Wu, L. Zhang, Z. Ying, J. Ke, and X. Hu, Low-velocity impact performance of hybrid 3D carbon/glass woven orthogonal composite: Experiment and simulation. *Compos B Eng*, vol. 196, Sep. 2020, doi: [10.1016/j.compositesb.2020.108098](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108098).
- [6] J. Xiong, R. Ghosh, L. Ma, A. Vaziri, Y. Wang, and L. Wu, Sandwich-walled cylindrical shells with lightweight metallic lattice truss cores and carbon fiber-reinforced composite face sheets. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 56, pp. 226–238, Jan. 2014, doi: [10.1016/J.COMPOSITESA.2013.10.008](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2013.10.008).
- [7] M. Albayrak, M. O. Kaman, and I. Bozkurt, Experimental and Numerical Investigation of the Geometrical Effect on Low Velocity Impact Behavior for Curved Composites with a Rubber Interlayer. *Applied Composite Materials*, vol. 30, no. 2, pp. 507–538, 2023, doi: [10.1007/s10443-022-10094-5](https://doi.org/10.1007/s10443-022-10094-5).
- [8] I. Bozkurt, M. O. Kaman, and M. Albayrak, Low-velocity impact behaviours of sandwiches manufactured from fully carbon fiber composite for different cell types and compression behaviours for different core types. *Materialpruefung/Materials Testing*, vol. 65, no. 9, pp. 1349–1372, 2023, doi: [10.1515/mt-2023-0024](https://doi.org/10.1515/mt-2023-0024).
- [9] İ. Bozkurt, M. Kaman, and M. Albayrak, LS-DYNA MAT162 Finding Material Inputs and Investigation of Impact Damage in Carbon Composite Plates. XVI. international research conference 2022., pp. 3–7, 2022.
- [10] B. Kazemianfar, M. Esmaeeli, and M. R. Nami, Response of 3D woven composites under low velocity impact with different impactor geometries. *Aerosp Sci Technol*, vol. 102, Jul. 2020, doi: [10.1016/j.ast.2020.105849](https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105849).
- [11] M. Y. Solmaz and T. Topkaya, The flexural fatigue behavior of honeycomb sandwich composites following low velocity impacts. *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 20, pp. 1–14, 2020, doi: [10.3390/app10207262](https://doi.org/10.3390/app10207262).
- [12] I. Bozkurt, M. O. Kaman, and M. Albayrak, Experimental and numerical impact behavior of fully carbon fiber sandwiches for different core types. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 5, p. 318, May 2024, doi: [10.1007/s40430-024-04865-3](https://doi.org/10.1007/s40430-024-04865-3).
- [13] W. He, S. Lu, K. Yi, S. Wang, G. Sun, and Z. Hu, Residual flexural properties of CFRP sandwich structures with aluminum honeycomb cores after low-velocity impact. *Int J Mech Sci*, vol. 161–162, no. July, p. 105026, 2019, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105026](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105026).
- [14] W. He, J. Liu, B. Tao, D. Xie, J. Liu, and M. Zhang, Experimental and numerical research on the low velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures. *Compos Struct*, vol. 158, pp. 30–43, 2016, doi: [10.1016/j.compstruct.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.009).
- [15] Y. Chen, K. Fu, S. Hou, X. Han, and L. Ye, Multi-objective optimization for designing a composite sandwich structure under normal and 45° impact loadings. *Compos B Eng*, vol. 142, no. December 2016, pp. 159–170, 2018, doi: [10.1016/j.compositesb.2018.01.020](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.020).
- [16] X. Zhang, F. Xu, Y. Zang, and W. Feng, Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact. *Compos Struct*, vol. 236, no. January, p. 111882, 2020, doi: [10.1016/j.compstruct.2020.111882](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111882).
- [17] W. He, J. Liu, S. Wang, and D. Xie, Low-velocity impact behavior of X-Frame core sandwich structures – Experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*, vol. 131, no. July, pp. 718–735, 2018, doi: [10.1016/j.tws.2018.07.042](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.042).
- [18] T. K. Demircioğlu, F. Balıkoğlu, O. İnal, N. Arslan, Ay, and A. Ataş, Experimental investigation on low-velocity impact response of wood skinned sandwich composites with different core configurations. *Mater Today Commun*, vol. 17, no. May, pp. 31–39, 2018, doi: [10.1016/j.mtcomm.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.08.003).
- [19] J. Wang, A. M. Waas, and H. Wang, Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Compos Struct*, vol. 96, pp. 298–311, 2013, doi: [10.1016/j.compstruct.2012.09.002](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.002).
- [20] Y. Rong, J. Liu, W. Luo, and W. He, Effects of geometric configurations of corrugated cores on the

- local impact and planar compression of sandwich panels. *Compos B Eng*, vol. 152, no. August, pp. 324–335, 2018, doi: [10.1016/j.compositesb.2018.08.130](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.130).
- [21] J. Liu, W. He, D. Xie, and B. Tao, The effect of impactor shape on the low-velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures. *Compos B Eng*, vol. 111, pp. 315–331, 2017, doi: [10.1016/j.compositesb.2016.11.060](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.060).
- [22] A. Khalkhali, N. Geran Malek, and M. Bozorgi Nejad, Effects of the impactor geometrical shape on the non-linear low-velocity impact response of sandwich plate with CNTRC face sheets. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 22, no. 4, pp. 962–990, May 2020, doi: [10.1177/1099636218778998](https://doi.org/10.1177/1099636218778998).
- [23] W. He, J. Liu, S. Wang, and D. Xie, Low-velocity impact response and post-impact flexural behaviour of composite sandwich structures with corrugated cores. *Compos Struct*, vol. 189, pp. 37–53, Apr. 2018, doi: [10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.01.024](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.01.024).
- [24] Z. Li et al., Impact response of a novel sandwich structure with Kirigami modified corrugated core. *Int J Impact Eng*, vol. 156, p. 103953, Oct. 2021, doi: [10.1016/J.Ijimpeng.2021.103953](https://doi.org/10.1016/J.Ijimpeng.2021.103953).
- [25] J. S. Yang et al., Low velocity impact behavior of carbon fibre composite curved corrugated sandwich shells. *Compos Struct*, vol. 238, no. August 2019, pp. 1–16, 2020, doi: [10.1016/j.compstruct.2020.112027](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112027).
- [26] Y. Cheng, K. Liu, Y. Li, Z. Wang, and J. Wang, Experimental and numerical simulation of dynamic response of U-type corrugated sandwich panels under low-velocity impact. *Ocean Engineering*, vol. 245, p. 110492, Feb. 2022, doi: [10.1016/J.OCEANENG.2021.110492](https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.110492).
- [27] T. Boonkong, Y. O. Shen, Z. W. Guan, and W. J. Cantwell, The low velocity impact response of curvilinear-core sandwich structures. *Int J Impact Eng*, vol. 93, pp. 28–38, 2016, doi: [10.1016/j.ijimpeng.2016.01.012](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.01.012).
- [28] M. R. Yellur, H. Seidlitz, F. Kuke, K. Wartig, and N. Tsombanis, A low velocity impact study on press formed thermoplastic honeycomb sandwich panels. *Compos Struct*, vol. 225, no. November 2018, p. 111061, 2019, doi: [10.1016/j.compstruct.2019.111061](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111061).
- [29] Ilyas Bozkurt, Effect of geometric configurations and curvature angle of corrugated sandwich structures on impact behavior. *Polym Compos*, pp. 1–24, 2024.
- [30] M. ALBAYRAK and M. O. KAMAN, Production of Curved Surface Composites Reinforced With Rubber Layer. *European Journal of Technic*, vol. 11, no. 1, pp. 19–22, 2021, doi: [10.36222/ejt.824761](https://doi.org/10.36222/ejt.824761).
- [31] I. Bozkurt, Determination of Deformation Behaviors and Energy Absorption of Lightweight Composite Lattice Cylinders With Different Structures. *Int J Polym Sci*, vol. 2024, no. 1, Jan. 2024, doi: [10.1155/2024/2280726](https://doi.org/10.1155/2024/2280726).
- [32] H. E. Yalkın, R. Karakuzu, and T. Alpyıldız, Low-velocity impact behaviors of sandwich composites with different structural configurations of foam core: numerical study and experimental validation. *Phys Scr*, vol. 98, no. 11, Nov. 2023, doi: [10.1088/1402-4896/ad008f](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad008f).
- [33] C. Atas, B. M. Icten, and M. Küçük, Thickness effect on repeated impact response of woven fabric composite plates. *Compos B Eng*, vol. 49, pp. 80–85, 2013, doi: [10.1016/j.compositesb.2013.01.019](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.01.019).
- [34] B. A. Gama, T. A. Bogetti, and J. W. Gillespie Jr, Progressive Damage Modeling of Plain-Weave Composites using LS-Dyna Composite Damage Model MAT162. 7th European LS-DYNA Conference, no. August 2014, 2009.
- [35] B. M. Icten, B. G. Kiral, and M. E. Deniz, Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates. *Compos B Eng*, vol. 50, pp. 325–332, 2013, doi: [10.1016/j.compositesb.2013.02.024](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.024).
- [36] İ. Bozkurt, Numerical Investigation of the Effects of Impactor Geometry on Impact Behavior of Sandwich Structures. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Sep. 2024, doi: [10.17798/bitlisfen.1482456](https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1482456).





Spatial assessment of urban heat island (UHI) in Kütahya using Landsat-8 satellite data

Landsat-8 uydu verilerini kullanarak Kütahya'daki kentsel ısı adasının (UHI) mekansal değerlendirmesi

Ali Samet Öngen^{1,*} , Enes Zengin² 

¹ Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, 43100, Kütahya, Türkiye

² Kütahya Dumlupınar University, Faculty of Architecture, Department of Urban and Regional Planning, 43100, Kütahya, Türkiye

Abstract

The Urban Heat Island (UHI) effect refers to the phenomenon where urban areas experience significantly higher temperatures than their rural surroundings due to human activities and modifications, such as replacing natural land cover with impervious surfaces, reducing vegetation, and increasing heat-absorbing materials. Kütahya central district has a dense population and building layout, which contributes to the intense UHI. Geographic Information System (GIS) and its tools are widely used in assessing UHI in urban areas, providing insights for both researchers and local authorities. The study aims to spatially evaluate the urban heat island in Kütahya using Landsat-8 satellite data. Landsat-8 images, operating in the 10.60 - 11.19 μm range acquired on August 8, 2023 (Path: 179, Row: 33, Cloud Cover: 0%) were utilized to create the Urban Heat Island (UHI) map for the study area. Through spatial analysis using Landsat-8 data for Kütahya city center, six different classes were defined, with the UHI map created using land surface temperature values. The highest and lowest UHI values vary between 4.245°C and -3.457°C. It has been observed that the average UHI increases by 12% in areas lacking dense building structures, characterized by rock surfaces and limited green areas. Conversely, in areas with parks, forests, and sparse settlements, the UHI decreases by 10%. With this study, a comprehensive evaluation of UHI was conducted for Kütahya city center. While the results obtained are expected to be an important resource for researchers and local authorities, they are also anticipated to be beneficial in the fields of engineering geology, urban geology, and urban planning.

Keywords: Kütahya, Landsat-8, Land surface temperature, Spatial analysis, Urban heat island

1 Introduction

Urban areas are experiencing increased crowding due to various economic, cultural, and social factors. The rising population in urban centers leads to an increase in rapid urbanization [1]. As a result, green spaces are being replaced

Öz

Kentsel Isı Adası (UHI) etkisi, şehir alanlarının, insan faaliyetleri ve değişiklikleri nedeniyle, kırsal çevreye göre önemli ölçüde daha yüksek sıcaklıklara maruz kalması olarak tanımlanabilir. Bu değişiklikler arasında doğal arazi örtüsünün geçirimsiz yüzeylerle değişmesi, bitki örtüsünün azalması ve ısıyı emen malzemelerin artması yer almaktadır. Kütahya merkez ilçesinin, yoğun nüfusu ve bina yerleşimi UHI etkisinin artmasına neden olmaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve araçları, kentsel alanlardaki UHI'yi değerlendirmede yaygın olarak kullanılmakta olup, hem araştırmacılara hem de yerel yetkililere önemli bilgiler sunmaktadır. Çalışma kapsamında Landsat-8 uydu verileri kullanarak Kütahya'daki kentsel ısı adasının mekansal olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanı için Kentsel Isı Adası (UHI) haritası oluşturmak amacıyla 8 Ağustos 2023'te (Path: 179, Row: 33, Cloud Cover: %0) alınan Landsat-8 görüntüleri kullanılmış, 10.60 - 11.19 μm aralığında çalışan verilerinden yararlanılmıştır. Kütahya şehir merkezi için Landsat-8 verileri kullanarak yapılan mekansal analizle altı farklı sınıf tanımlanmış olup, arazi yüzey sıcaklığı değerleri kullanılarak UHI haritası oluşturulmuştur. En yüksek ve en düşük UHI değerleri sırasıyla 4.245°C ile -3.457°C arasında değişmektedir. Yoğun bina yapısının bulunmadığı, kaya yüzeyleri ve sınırlı yeşil alanlarla karakterize edilen bölgelerde ortalama UHI'nin %12 arttığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, parklar, ormanlar ve seyrek yerleşim alanları olan bölgelerde UHI %10 azalmıştır. Bu çalışma ile Kütahya şehir merkezi için kapsamlı bir UHI değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçların araştırmacılar ve yerel yetkililer için önemli bir kaynak olması beklenirken, mühendislik jeolojisi, kentsel jeoloji ve şehir planlama alanlarında da faydalı olması öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kütahya, Landsat-8, Yüzey sıcaklığı, Mekansal analiz, Kentsel ısı adası

by man-made artificial surfaces (buildings, pavements, asphalt, bridges, subway tunnels, etc.). Artificial surfaces in city centers absorb solar heat energy, leading to higher air temperatures compared to the surrounding rural areas. This phenomenon, initially explored by [2], is known as the Urban

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: alisamet.ongen@dpu.edu.tr (A. S. Öngen)
Geliş / Received: 02.08.2024 Kabul / Accepted: 23.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1527341

Heat Island (UHI) effect. Consequently, air temperatures in urban areas can be up to 10°C warmer than those in rural regions [3-5]. Alterations in land use and cover can impact ecosystems on multiple scales, ranging from local areas to the global landscape, and play a significant role in the progression of climate change. UHI, stands as a key contributor to these climate alterations [6]. One of the main reasons for UHI is the lack of vegetation in urban spaces and population-dense districts [7]. Plants release solar rays back into the atmosphere through evapotranspiration (evaporation and transpiration). With increased urbanization and the consequent reduction of green spaces, evapotranspiration decreases, and solar rays are trapped by artificial surfaces. This replacement of natural vegetation with artificial surfaces is a primary cause of the urban heat island effect, leading to higher air temperatures in city centers compared to rural areas. Temperature measured on an asphalt surface during the daytime can be 20°C higher than on grass. [8], It is also noted that cover materials like concrete and asphalt absorb 60-95% of incoming solar rays, reflecting only 5-40% back [9]. Human-made structures such as buildings, pavements, filled areas, subway tunnels, electrical cables, district heating systems, and sewage systems contribute to the urban heat island effect [10,11]. Additionally, fluctuations in LST between day and night also influence the UHI effect. Numerous studies have emphasized the substantial temperature increase in urban centers compared to rural areas [9, 12-15]. This temperature rise is attributed not only to climatic factors but also to the UHI effect [16]. Research in Istanbul examined the link between population growth and the UHI effect, revealing that in the densely constructed southern part of Istanbul, the average air temperature has risen by 0.47°C over the past 40 years, while in the less developed northern part, it has decreased by 1.17°C [17]. This suggests that temperature increases in urban centers result from both climatic factors and the UHI effect. Similarly, [18] in Istanbul highlighted that the UHI factor correlates with population and city size. However, the UHI effect is not limited to large cities; it is also observed in small and medium-sized cities [19]. A similar study carried out by [20] with a different perspective to focus on UHI and geothermal energy potential in Kütahya. This effect depends on various factors such as topography, the density of human-made structures, weather conditions, and the presence and distribution of parks and gardens within the city. Urban areas with more green spaces can alleviate the UHI effect. It is also noted that the UHI effect exhibits heterogeneous distribution within a city and is a locally specific concept. Consequently, the intensity of the UHI shows variations within a city depending on the types of areas in the city center, such as buildings, structures, parks, green zones, etc. Geographic Information Systems (GIS) and its tools are widely used by researchers in earth science, offering diverse perspectives on various focus areas such as geological mapping, climate change, natural resource management, disaster response, earthquakes, image processing, micro and macro feature extraction, environmental monitoring, and urban planning and geology [21-30]. Mapping analysis as a part of GIS can be used to explore, illustrate and analyze the UHI

phenomenon. In order to assess the UHI effect with Landsat-8 imagery, scientists use the thermal infrared data from the Thermal Infrared Sensor (TIRS). This process includes selecting Landsat-8 images of the study area with the least cloud cover and from comparable seasons for accurate comparison in terms of time series. These images can then be analyzed to process the raw satellite data into land surface temperature datasets using GIS-based programs like ArcGIS, QGIS, etc. It is also possible to detect warmer urban areas by correlating the temperature dataset with land cover information from satellite data. This also helps to measure the UHI effect and its severity within urban districts and neighboring rural regions to identify the parameters contributing to UHI. Landsat 8 data was used from 2014 to 2016 to analyze the surface UHI effects in Bangkok, to identify temperature distribution in dense urban areas, and to provide detailed information for mitigation strategies as a part of environmental sustainability, urban planning and policymakers [31]. Another methodology was developed using Landsat 8 thermal infrared images to detect and analyze UHI, providing data for urban planning and improving thermal comfort in cities by monitoring temperature anomalies over time [32]. As part of a study focusing on the surface UHI effect in Stuttgart (Germany) using Landsat-8 data show that a decrease in surface UHI by 1.4°C from 2004-2008 to 2016-2020, while there is a 2.5°C rise in land surface temperature, which shows land cover changes, is key factors affecting local temperature variations, important for urban planning and policy evaluation [33]. A study assessed the surface UHI effect in Bursa, Türkiye for a time frame from 2002 to 2020 by using Landsat 7-8 images to analyze changes in land use/land cover (LULC) and land surface temperature (LST), implementing indices like NDVI to classify urban, vegetation, and water zones, reveals an overall increase in LST and significant growth in SUHI intensity over the last 18 years [34]. Urban Heat Island (UHI) effects across different local climate zones in Bragança, Portugal, utilizing air temperature data, Landsat 8 imagery, and on-site measurements were also investigated [35]. A new method was developed, using Landsat imagery, to accurately map UHI in Nanjing, China, from 2000 to 2021, revealing a correlation between urban development, green space expansion, and changes in UHI intensity [36]. In Kütahya, located in the western part of Turkey, population and urbanization continuously increase (Figure 1). As the population grows, new areas are being developed, urbanization rates are rising, and the amount of agricultural and green spaces is diminishing. This trend increases the likelihood of the emergence or intensification of the urban heat island effect in city centers. This study aims to detect and analyze UHI in Kütahya using Landsat-8 satellite imagery from August 2023. The research intends to identify temperature differences between urban/rural areas and the spatial analysis of the UHI effect, thereby contributing to urban planning and environmental management strategies.

2 Methodology

2.1 Study area

Kütahya, located on the border of the Aegean and

Central Anatolia regions, lies between the northern latitudes of 38°70' and 39°80' and the eastern longitudes of 29°00' and 30°30'. With an area of 12.014 km², Kutahya comprises approximately 1.5% of Turkey's land according to the Turkish Statistical Institute (TÜİK, 2023). It is bordered by the provinces of Bursa, Bilecik, Eskişehir, Afyonkarahisar, Uşak, Manisa, and Balıkesir. The city center of Kütahya generally has a flat topography. The city is established on an alluvial plain irrigated by the Porsuk and Felent rivers, at the foothills of Yellice Mountain. The highest elevation in the city is Yellice Mountain, located south of the city, with a peak of 1901 meters. Due to the Kütahya Fault Zone, a sudden increase in slope is observed between the Kütahya Plain and Yellice Mountain. According to the TÜİK Address-Based Population Registration System (ADNKS) statistics for 2023, the total population of Kütahya, including its districts, is 571.463. Approximately half of the total population (284.536 people) resides in the central district, which is more socially and economically developed compared to other districts. The urban population of the central district is 253.583, while the rural population is 30.953. TÜİK data shows that the rural population last increased between 1997 and 2000. Since then, there has been an increase in rural-to-urban migration, leading to a decrease in the rural population. Consequently, urbanization, which reduces green spaces, has continuously increased with the growing population. According to the ESRI Sentinel-2 Land Cover Explorer, in 2023, the land cover distribution for Kütahya is dominated by rangeland, which constitutes 36.39% of the total area. Cropland follows at 28.24%, and built-up areas cover 26.11%. Trees make up 8.65%, while bare ground represents 0.53%. Water bodies account for 0.07%, and flooded vegetation is minimal at 0.01%. Although Kütahya is in the Aegean region, it does not fully reflect the climate characteristics of the Aegean region due to its distance from the sea and its elevation. According to the [37] climate classification (1954), Kütahya falls under the CSB climate category (hot and dry summers, cool and wet winters). The temperature is influenced by Central Anatolia, while precipitation is affected by the Marmara region. The spring and autumn seasons are quite rainy. According to the State Meteorological Service (DMI), the highest monthly precipitation in Kütahya city center was observed in December, with 75.22 mm/month between 1970 and 2020. The annual average precipitation is 557.11 mm/year. During the same period, the annual average temperature is 10.81°C/year, with the lowest average temperature in January at 0.36°C/month and the highest average temperature in July at 21.00°C. In July, when temperatures are highest, precipitation drops to 18.37 mm/month.

2.2 Data collection

Landsat 8 imagery acquired from the USGS Earth Explorer for August 8th, 2023, Path: 179 Row: 33 with 0% cloud cover, was utilized for the assessment of UHI in Kütahya city center. The satellite imagery, belonging to

Landsat Collection 2 Level 1, offers a comprehensive view of the cityscape at a moderate spatial resolution of 30 meters to provides to perform a generalized assessment, enabling the analysis of land surface temperatures and the identification of heat islands.

2.3 Land surface temperature (LST) retrieval from thermal band

Land surface temperature (LST) plays a pivotal role in the exchange of long-wave radiation and turbulent heat fluxes at the interface between the Earth's surface and the atmosphere. It is a key parameter that governs physical processes on surface energy and water balance from small to large scales from globally down to locally [38-40]. Measuring LST helps researchers understand the heat dynamics of different surfaces, monitor changes over time, and analyze UHI phenomena, which are areas of elevated temperatures within urban areas compared to their rural surroundings. LST data is typically obtained from satellite thermal infrared sensors, which capture the radiation emitted from the Earth's surface. These data help study climate change, land use patterns, ecosystem dynamics, and human-environment interactions and more. There are two thermal infrared sensors (TIRS) on Landsat 8; Band 10 and Band 11. These bands capture data in the long-wave infrared spectrum, with Band 10 operating between 10.60 - 11.19 μm and Band 11 between 11.50 - 12.51 μm. Each pixel in these bands represents a spatial resolution of 100 meters, which was resampled to 30 meters during Level-1 product generation, allowing for the estimation of LST with in more detail. The thermal data collected by Landsat 8 provides precise monitoring of temperature variations and the identification of thermal anomalies, which is important for applications such as UHI analysis, wildfire research, etc. In addition to this, Landsat 8 data is also instrumental in agriculture, particularly for monitoring crop health and stress levels. Thermal imagery helps detect variations in plant temperature, indicating water stress, nutrient deficiencies, or pest infestations. Farmers and agricultural specialists can leverage this data for optimized irrigation planning, pest management, and yield prediction., wildfire analysis, and detection. While both Band 10 and Band 11 are suitable for thermal studies, the USGS has advised against utilizing TIRS Band 11 due to its higher calibration uncertainty [41-42]. As a result, only Band 10 was employed in this study within this context. Simplified flowchart of the study and applied methods is given in Figure 2.

2.3.1 Top of atmospheric (TOA) spectral radiance

The first step in calculation of the Land Surface Temperature (LST) is TOA spectral radiance calculation. TOA represents a dimensionless value indicating the ratio of reflected radiance to the incident solar radiance reaching the Earth's surface. Its calculation relies on spectral radiance measurements, incorporating the average solar irradiance spectrum and the solar zenith angle. Equation 1 was used to calculate the TOA by using Raster Calculator tool in ArcGIS

Pro. Acquired TOA spectral radiance values are used in the calculation of brightness temperature.

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL - O_i \quad (1)$$

M_L : Band-specific multiplicative rescaling factor, Q_{cal} : Pixel values of Band 10, AL : Band-specific additive rescaling factor, Q_i : Band 10 correction value

2.3.2 Conversion of TOA to brightness temperature

Following the acquisition of TOA spectral radiance, the next step is to convert it to brightness temperature. This involves using Planck's Law, which describes spectral radiance as a function of wavelength and temperature, to convert the radiance to brightness temperature [43]. Brightness temperature represents the temperature of a black body emitting the same amount of radiation. For practical use, Planck's Law is often simplified with precomputed sensor-specific constants K_1 and K_2 . Equation 2 used to conversion of TOA spectral radiance to brightness temperature. To obtain the results in Celsius, the radiant temperature is adjusted by subtracting the absolute zero (-273.15°C). Using the same approach applied for the calculation in Equation 1, the Raster Calculator tool in ArcGIS Pro toolbox is employed for Equation 2. In order to use brightness temperature values for the determination of LST, they should be corrected for spectral emissivity (ϵ). The emissivity correction is based on the type of land cover and is performed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which is calculated in the next step.

$$BT = (K_2 / (\ln(K_1/L) + 1)) - 273.15 \quad (2)$$

K_2 : Band-specific thermal conversion constant, K_1 : Band-specific thermal conversion constant from metadata, L : Spectral radiance of TOA

2.3.3 Calculation of normalized difference vegetation index (NDVI)

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is a parameter used to calculate LST for brightness temperature correction for spectral emissivity. LST can be used in environmental and agricultural studies and reflects the temperature of the Earth's surface, which can be measured both remotely and on-site. NDVI also provides information about variations in vegetation cover and health, and can be used by researchers to assess the influence of vegetation on thermal measurements [44-46]. NDVI values are calculated using the Raster Calculator tool in ArcGIS Pro toolbox by using Equation 3 for processing. NDVI values also calculate the vegetation cover proportion (P_v).

$$NDVI = (\text{Band 5} - \text{Band 4}) / (\text{Band 5} + \text{Band 4}) \quad (3)$$

Band 5: Pixel values of Band 5, Band 4: Pixel values of Band 4

2.3.4 Calculation of proportion of vegetation (P_v) and emissivity (ϵ)

The proportion of vegetation (P_v) is determined using indices like NDVI to calculate the fraction of an area covered

by vegetation based on differences between NDVI values and predefined threshold limits for soil and vegetation [47]. Emissivity (ϵ) measures how efficiently a surface emits thermal radiation depending on surface type and conditions. Emissivity correction in remote sensing is important for accurate temperature measurements for LST to ensure adjustments for vegetation and surface properties for environmental monitoring, agriculture, and climate studies [48]. Equations 4 and 5 calculate the proportion of vegetation and emissivity parameters using the same methodology applied in earlier steps.

$$P_v = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (4)$$

$$\epsilon = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (5)$$

NDVI: Calculated vegetation index, $NDVI_{min}$: Lowest NDVI value observed, $NDVI_{max}$: Highest NDVI value observed, P_v : Percentage of fraction of an area covered by vegetation, ϵ : Value of a surface emits thermal radiation

2.3.5 Calculation of land surface temperature (LST)

Applying the previously discussed parameters, Equation 6 calculates pixel-wise Land Surface Temperature (LST) values across the study area. This process involves converting thermal data into radiance, computing brightness temperatures adjusted for emissivity, and finally mapping LST, providing spatial insights into surface temperature variations crucial for environmental monitoring and resource management [49-51].

$$LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1,4388) * \ln(\epsilon))) \quad (6)$$

BT: Brightness temperature, ϵ : Emissivity value

2.3.6 Urban heat island (UHI)

The conversion of LST values to UHI metrics involves several steps. Initially, LST data, mostly gathered from satellites like Landsat 8, is processed to put forward information about temperature variations over different urban and rural areas. Equation 7 is applied to standardize temperature differences, allowing for the quantification of UHI intensity across the study area.

$$UHI = (LST - LST_{mean}) / SD \quad (7)$$

LST: Land surface temperature (°C), LST_{mean} : The mean land surface temperature (°C), SD: Standard deviation of temperature

3 Results

This study is considered to offer significant insights into the Urban Heat Island (UHI) phenomenon in the studied area by utilizing Landsat-8. The analysis focused on getting the spatial variations in LST to understand the extent and intensity of UHI within the Kütahya central district and surroundings. A high-resolution UHI map was prepared for the study area using Landsat-8 data to identify the temperature distribution and hotspots with higher

temperature values to characterize the UHI of the Kütahya central district. Another study goal is to provide information for urban planning and sustainable development strategies and approaches. Figure 3 displays the UHI intensity within Kütahya's central area, with hotspots having varying temperatures. Using Landsat 8 data, a UHI map was generated, showing the areas with higher temperatures and corresponding urban areas with minimal vegetation cover. Information about hotspots and insight into the parameters contributing to UHI in the Kütahya central district is also important for urban planning and sustainable development strategies. Figure 3 explains the variation in UHI intensity across the Kütahya central district. These hotspots were classified based on their temperature variations, land use and land cover: urban industrial areas, green zones, rock outcrops, forests, and dense or sparse urbanization. This classification defines how different types of land use and urban morphology contribute to variations in local temperature patterns. Also it provides information about areas with significant UHI effects and cooler spots within the city. The maximum UHI value recorded in the study area was 4.2°C, observed mostly around the rock outcrops (Class 3) located in the northern part of the Kütahya central district, urban industrial site (Class 1) and dense urbanization (Class 5). In contrast, the minimum UHI intensity recorded was -3.5°C along forests (Class 4), sparse urbanization (Class 6) and green spaces (Class 2).

4 Discussions and conclusions

It is believed that this study provides valuable insights in terms of UHI for the study area by using Landsat-8. The analysis of LST variations revealed significant spatial heterogeneity in UHI across the Kütahya urban landscape and surrounding rural regions. High-resolution temperature map derived Landsat-8 data highlighted areas with high-temperature values, mostly observed in dense urban development and rock outcrops, with limited/no vegetation cover. These findings show the impact of urban morphology

and land use patterns on local temperature patterns, similar to the previous research highlighting the role of surfaces and reduced green spaces [52-54]. The classification of specific spots within Kütahya based on temperature characteristics further explains the influence of different land cover types on UHI. Areas categorized as urban industrial sites and densely urbanized zones show the highest UHI, reaching up to 4.245°C from average LST values in the study area. These locations typically experience increased heat retention due to the large number of buildings and infrastructure. In contrast, cooler spots within the city, such as forests, sparse urbanized areas, and green spaces, show lower UHI, reaching as low as -3.457°C from average LST values.

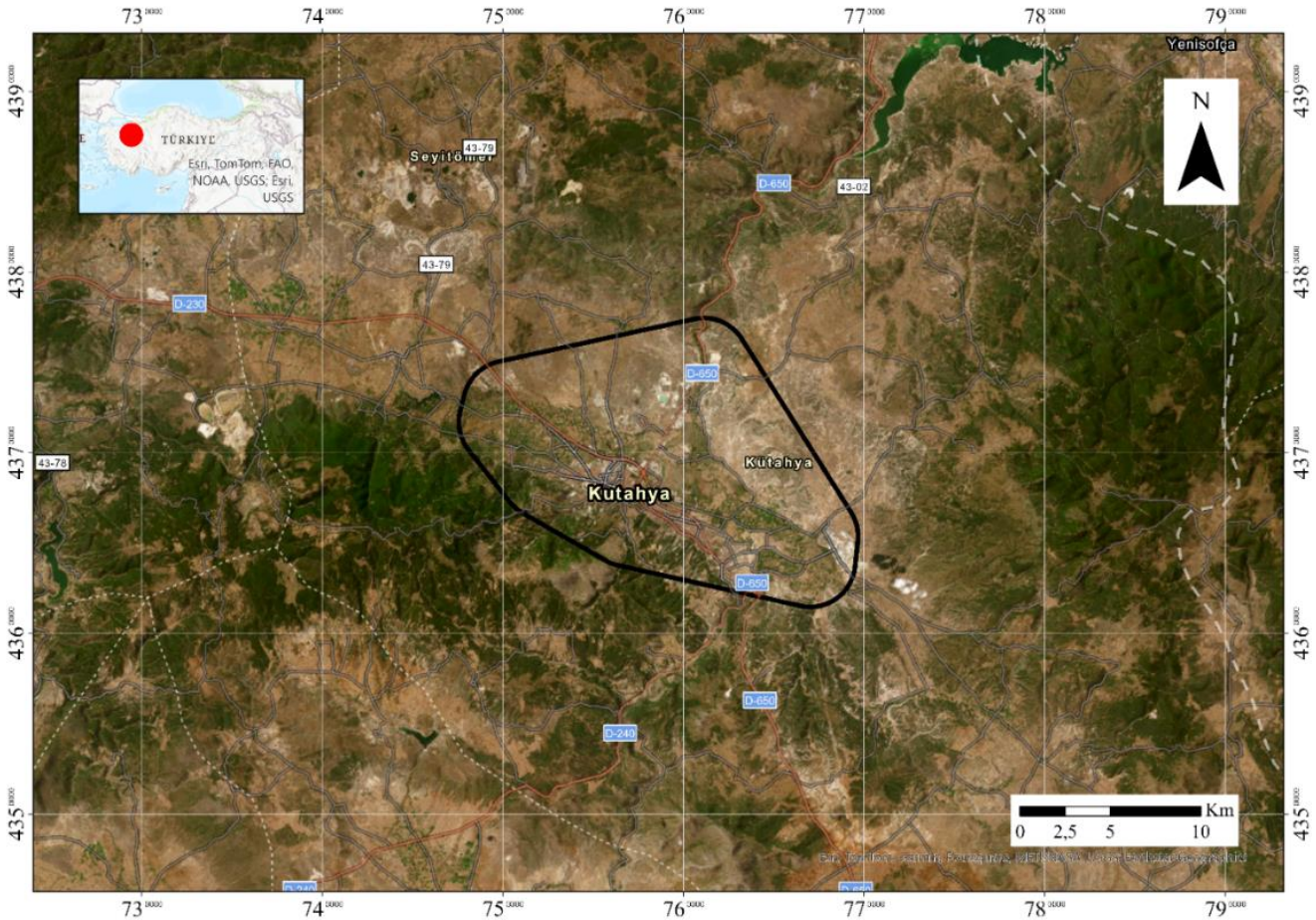


Figure 1. Kütahya central district and general view of the study area.

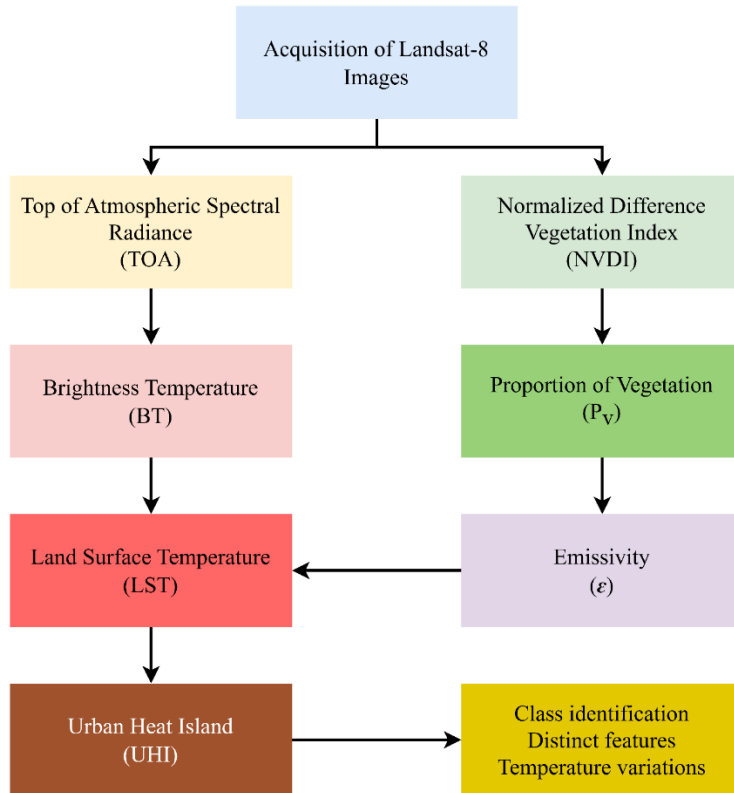


Figure 2. Simplified flow chart of applied methodology.

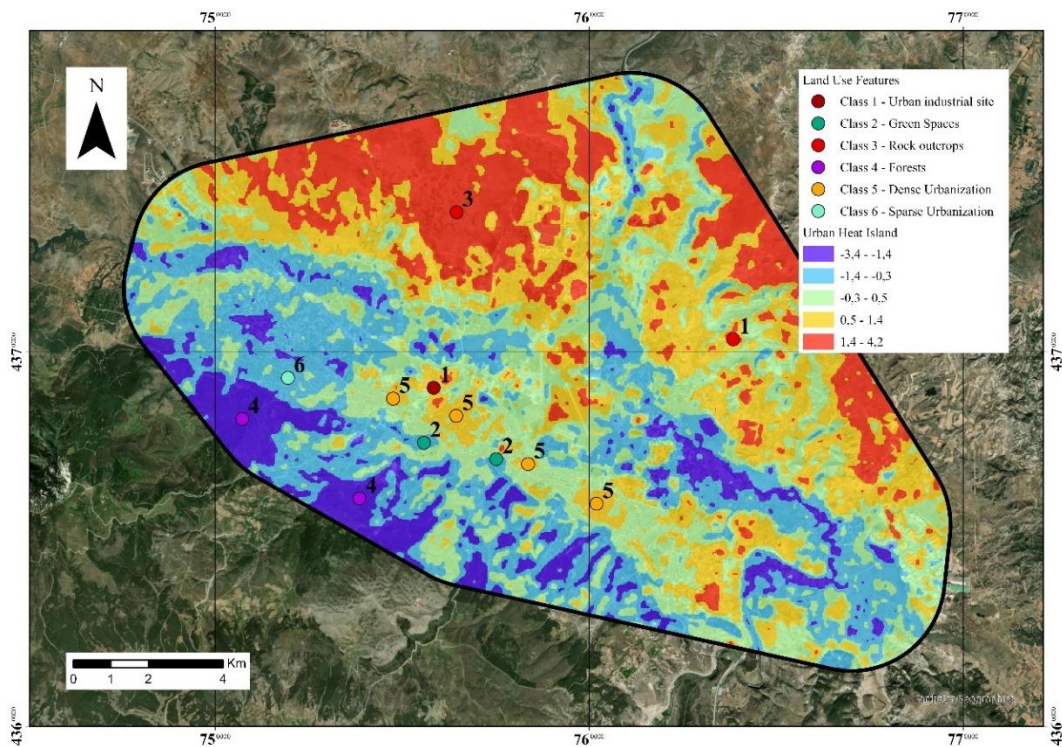


Figure 3. Urban heat island (UHI) and significant land use feature in the study area.

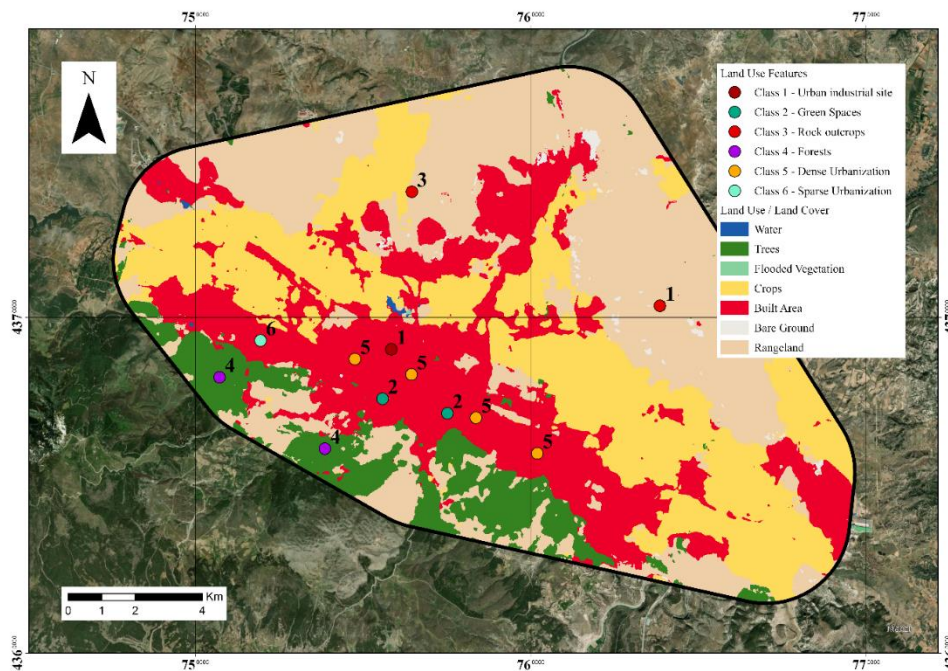


Figure 4. Land Use and Land Cover map of the study area (Simplified from ArcGIS Living Atlas)

In Table 1, zonal statistics comparing land use categories with urban heat island (UHI) data reveal distinct patterns in temperature effects are given. Water and tree-covered areas exhibit a cooling effect with mean UHI values of -1.5°C and -1.7°C , respectively, indicating that these land uses generally mitigate the UHI effect. Flooded vegetation also shows a cooling tendency, with a mean UHI of -1.4°C . In contrast, cropland has a neutral effect on UHI with a mean value of 0.0°C , suggesting it neither significantly warms nor cools the area. Built-up areas and bare ground, on the other hand, contribute to a warming effect, with mean UHI values of 0.2°C and 0.5°C , respectively. Rangeland exhibits the highest mean UHI of 0.8°C , indicating the most pronounced warming effect among the land use categories. The range of UHI values is widest for rangeland (7.3°C) and built-up areas (6.8°C), reflecting considerable variability in temperature effects, while cropland shows a moderate range of 6.1°C . A positive relationship between areas with high temperature differences in terms of UHI effects and land use types is evident in Figures 3 and 4. These figures illustrate that areas experiencing significant temperature variability are closely associated with specific land use categories. For instance, land uses with a pronounced warming effect, such as dense and sparse built-up areas and rangeland, show a direct correlation with higher temperature variations. Conversely, land uses that generally cool the environment, like water bodies and tree cover, are associated with lower temperature differences. This correlation underscores the influence of different land uses on the magnitude of UHI effects, providing a clearer understanding of how varying land uses contribute to temperature fluctuations within urban and peri-urban areas.

These findings highlight the cooling effect of vegetation and open spaces in mitigating UHI impacts by providing shade and promoting evaporative cooling processes.

Table 1. Zonal statistics comparing land use and urban heat island data.

Class Name	Min	Max	Range	Mean	STD
Water	-2.4	-0.1	2.3	-1.5	0.5
Trees	-3.5	0.9	4.4	-1.7	0.8
Flooded Vegetation	-1.8	1.0	2.8	-1.4	0.7
Crops	-2.7	3.4	6.1	0.0	1.1
Built Area	-3.1	3.6	6.8	0.2	0.8
Bare Ground	-1.2	2.4	3.6	0.5	0.8
Rangeland	-3.1	4.2	7.3	0.8	1.0

In conclusion, this study spotlights the spatial variability of UHI intensity in Kütahya's central district. It underscores the importance of considering urban planning strategies integrating green infrastructure and sustainable development practices. The use of Landsat-8 satellite data proved instrumental in mapping and understanding UHI dynamics, providing a comprehensive spatial analysis of temperature variations across different land use categories. Addressing UHI challenges requires proactive measures such as increasing urban greenery, promoting cool roof technologies, changing asphalt colour, environmentally building paints and implementing heat-resilient urban design principles. These efforts are very important for improving urban life quality, reducing energy consumption, and mitigating the adverse effects of climate change in urban areas like Kütahya. New technologies like UAV mapping, field-based measurements can also create more detailed

UHI, enabling extensive and detailed evaluations for urban cooling strategies, surface heat monitoring, capturing small-scale surface temperature variations, etc. [55-57] Implementing high-resolution Land Surface Temperature (LST) mapping using UAVs and on-site measurements can create more accurate and localized maps. These maps would benefit local authorities and researchers, providing valuable insights for urban planning.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Kütahya Dumlupınar University for granting access to ArcGIS Pro software.

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): 16%

References

- [1] M.K. Anser, M. Alharthi, B. Aziz, S. Wasim, Impact of urbanization, economic growth, and population size on residential carbon emissions in the SAARC countries, *Clean Technologies and Environmental Policy*. 22, 923-936, 2022. doi:10.1007/s10098-020-01833-y.
- [2] L. Howard, *The Climate of London*, Harvey and Dorton. I-II (1883).
- [3] K. Klysiak, K. Fortuniak, Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland, *Atmospheric Environment*. 33 3885-3895, 1999. doi:10.1016/S1352-2310(99)00131-4.
- [4] H. Li, Y. Zhou, G. Jia, K. Zhao, J. Dong, Quantifying the response of surface urban heat island to urbanization using the annual temperature cycle model, *Geoscience Frontiers*. 13 101141, 2022. doi:10.1016/j.gsf.2021.101141.
- [5] L. Li, Y. Zha, R. Wang, Relationship of surface urban heat island with air temperature and precipitation in global large cities, *Ecological Indicators*. 117, 106683, 2020. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106683.
- [6] S. Barrao, R. Serrano-Notivoli, J.M. Cuadrat, E. Tejedor, M.A. Saz Sánchez, Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network, *Urban Climate*. 44 101207, 2022. doi:10.1016/j.uclim.2022.101207.
- [7] X. Gui, L. Wang, R. Yao, D. Yu, C. Li, Investigating the urbanization process and its impact on vegetation change and urban heat island in Wuhan, China, *Environmental Science and Pollution Research*. 26, 30808-30825, 2019. doi:10.1007/s11356-019-06273-w.
- [8] H. Takebayashi, M. Moriyama, Relationships between the properties of an urban street canyon and its radiant environment: Introduction of appropriate urban heat island mitigation technologies, *Solar Energy*. 86, 2255-2262, 2012. doi:10.1016/j.solener.2012.04.019.
- [9] G. Ferguson, A.D. Woodbury, Urban heat island in the subsurface, *Geophysical Research Letters*. 34, GL032324, 2007. doi:10.1029/2007GL032324.
- [10] K. Menberg, P. Blum, A. Schaffitel, P. Bayer, Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island, *Environmental Science & Technology*. 47, 9747-9755, 2013. doi:10.1021/es401546u.
- [11] H.N. Pollack, S. Huang, P.-Y. Shen, Climate Change Record in Subsurface Temperatures: A Global Perspective, *Science*. 282, 279-281, 1998. doi:10.1126/science.282.5387.279.
- [12] K.P. Gallo, T.W. Owen, Satellite-Based Adjustments for the Urban Heat Island Temperature Bias, *Journal of Applied Meteorology*. 38, 806-813, 1999. doi:10.1175/1520-0450(1999)038<0806:SBAFTU>2.0.CO;2.
- [13] F. Perrier, J.-L. Le Mouél, J.-P. Poirier, M.G. Shnirman, Long-term climate change and surface versus underground temperature measurements in Paris, *International Journal of Climatology*. 25, 1619-1631, 2005. doi:10.1002/joc.1211.
- [14] R.A. Spronken-Smith, T.R. Oke, Scale Modelling of Nocturnal Cooling in Urban Parks, *Boundary-Layer Meteorology*. 93, 287-312, 1999. doi:10.1023/A:102001408973.
- [15] M. Taniguchi, T. Uemura, K. Jago-on, Combined Effects of Urbanization and Global Warming on Subsurface Temperature in Four Asian Cities, *Vadose Zone Journal*. 6 591-596, 2007. doi:10.2136/vzj2006.0094.
- [16] K. Kataoka, F. Matsumoto, T. Ichinose, M. Taniguchi, Urban warming trends in several large Asian cities over the last 100 years, *Science of The Total Environment*. 407, 3112-3119, 2009. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.09.015.
- [17] M. Karaca, Ü. Antepioğlu, H. Karsan, Detection of urban heat island in Istanbul, Turkey, *Il Nuovo Cimento C*. 18 (1), 995, 49-55. doi:10.1007/BF02561458.
- [18] Y. Ezber, O. Lutfi Sen, T. Kindap, M. Karaca, Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis, *International Journal of Climatology*. 27, 667-679, 2007. doi:10.1002/joc.1420.
- [19] O.S. Pinho, M.D.M. Orgaz, The urban heat island in a small city in coastal Portugal, *International Journal of Biometeorology*. 44, 198-203, 2020. doi:10.1007/s004840000063
- [20] A.S. Öngen, Z.A. Ergüler, The effect of urban heat island on groundwater located in shallow aquifers of Kutahya city center and shallow geothermal energy potential of the region, *Bulletin Of The Mineral Research and Exploration*. 1-24, 2020. doi:10.19111/bulletinofmre.820395.
- [21] R.U. Acar, C. Özkul, Investigation of heavy metal pollution in roadside soils and road dusts along the Kütahya-Eskişehir Highway, *Arabian Journal of Geosciences*. 13, 216, 2020. doi:10.1007/s12517-020-5206-2.

- [22] R.U. Acar, E. Zengin, Performance Assessment of Landsat 8 and Sentinel-2 Satellite Images for the Production of Time Series Land Use/Land Cover (LULC) Maps, *Journal of Scientific Reports-A*. 1-15, 2023. doi:10.59313/jsr-a.1213548.
- [23] M. Bagyaraj, V. Senapathi, S. Karthikeyan, S.Y. Chung, R. Khatibi, A.A. Nadiri, B. Asgari Lajayer, A study of urban heat island effects using remote sensing and GIS techniques in Kancheepuram, Tamil Nadu, India, *Urban Climate*. 51, 101597, 2023. doi:10.1016/j.uclim.2023.101597.
- [24] B. Doğan, F. Şen, E. Zengin, S. Alaçam, N. Çakıcı Alp, Tectonic Model of the Surface Ruptures Geometry of M 7.7 and M 7.6 Earthquakes, of Their Source Faults of Kahramanmaraş (Türkiye) on 06/02/2023, içinde: Chamber of Geological Engineers of Türkiye, Ankara, Türkiye, 2023.
- [25] R. Eker, A. Aydın, J. Hübl, Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study, *Environmental Monitoring and Assessment*. 190, 28, 2017. doi:10.1007/s10661-017-6402-8.
- [26] Z.A. Erguler, E. Zengin, G. Kalyoncu Erguler, Time-dependent physicochemical behavior of ballasts used for railway between Sabuncupinar and Kütahya in Western Turkey, *Environmental Earth Sciences*. 75 918, 2016. doi:10.1007/s12665-016-5724-0.
- [27] K.M. Nissen, M. Wilde, T.M. Kreuzer, A. Wohlers, B. Damm, U. Ulbrich, A decrease in rockfall probability under climate change conditions in Germany, *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 23, 2737-2748, 2023. doi:10.5194/nhess-23-2737-2023.
- [28] E. Zengin, Inundation risk assessment of Eastern Mediterranean Coastal archaeological and historical sites of Türkiye and Greece, *Environmental Monitoring and Assessment*. 195, 968, 2023. doi:10.1007/s10661-023-11549-3.
- [29] E. Zengin, A Combined Assessment of Sea Level Rise (SLR) Effect on Antalya Gulf (Türkiye) and Future Predictions on Land Loss, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 51, 1121-1133, 2023. doi:10.1007/s12524-023-01694-0.
- [30] E. Zengin, Z.A. Erguler, Experimental investigation of pore-fracture relationship on failure behaviour of porous rock materials, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 81, 351, 2022. doi:10.1007/s10064-022-02857-y.
- [31] C. Keeratikasikorn, S. Bonafoni, Urban Heat Island Analysis over the Land Use Zoning Plan of Bangkok by Means of Landsat 8 Imagery, *Remote Sensing*. 10, 440, 2018. doi:10.3390/rs10030440.
- [32] V.I. Kashtan, K.L. Serhieieva, O.V. Korobko, D.V. Ivanov, Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images, *System Technologies*. 3, 87-98, 2023. doi:10.34185/1562-9945-3-146-2023-09.
- [33] G. Seeberg, A. Hostlowsky, J. Huber, J. Kamm, L. Lincke, C. Schwingshackl, Evaluating the Potential of Landsat Satellite Data to Monitor the Effectiveness of Measures to Mitigate Urban Heat Islands: A Case Study for Stuttgart (Germany), *Urban Science*. 6, 82, 2022. doi:10.3390/urbansci6040082.
- [34] N. Aslan, D. Koc-San, The Use of Land Cover Indices for Rapid Surface Urban Heat Island Detection from Multi-Temporal Landsat Imageries, *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 10, 416, 2021. doi:10.3390/ijgi10060416.
- [35] C.R.D. Almeida, L. Furst, A. Gonçalves, A.C. Teodoro, Remote Sensing Image-Based Analysis of the Urban Heat Island Effect in Bragança, Portugal, *Environments*. 9, 98, 2022. doi:10.3390/environments9080098.
- [36] N. Na, D. Xu, W. Fang, Y. Pu, Y. Liu, H. Wang, Automatic Detection and Dynamic Analysis of Urban Heat Islands Based on Landsat Images, *Remote Sensing*. 15, 4006, 2023. doi:10.3390/rs15164006.
- [37] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated, *Meteorologische Zeitschrift*. 15, 259-263, 2006. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130.
- [38] M.C. Anderson, J.M. Norman, W.P. Kustas, R. Houborg, P.J. Starks, N. Agam, A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales, *Remote Sensing of Environment*. 112, 4227-4241, 2008. doi:10.1016/j.rse.2008.07.009.
- [39] N.A. Brunsell, R.R. Gillies, Length Scale Analysis of Surface Energy Fluxes Derived from Remote Sensing, *Journal of Hydrometeorology*. 4, 1212-1219, 2003. doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1212:LSAOSE>2.0.CO;2.
- [40] A. Karnieli, N. Agam, R.T. Pinker, M. Anderson, M.L. Imhoff, G.G. Gutman, N. Panov, A. Goldberg, Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations, *Journal of Climate*. 23, 618-633, 2010. doi:10.1175/2009JCL12900.1.
- [41] U. Avdan, G. Jovanovska, Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data, *Journal of Sensors*. e1480307, 2016. doi:10.1155/2016/1480307.
- [42] J.A. Barsi, J.R. Schott, S.J. Hook, N.G. Raqueno, B.L. Markham, R.G. Radocinski, Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Vicarious Radiometric Calibration, *Remote Sensing*. 6, 11607-11626, 2014. doi:10.3390/rs6111607.
- [43] H.D. Young, R.A. Freedman, *University Physics with Modern Physics*, Pearson Education, 2015.
- [44] S. Mohanasundaram, T. Baghel, V. Thakur, P. Udmale, S. Shrestha, Reconstructing NDVI and land surface temperature for cloud cover pixels of Landsat-8 images for assessing vegetation health index in the Northeast region of Thailand, *Environmental Monitoring and Assessment*. 195, 211, 2022. doi:10.1007/s10661-022-10802-5.
- [45] A. Naga Rajesh, S. Abinaya, G. Purna Durga, T.V. Lakshmi Kumar, Long-term relationships of MODIS NDVI with rainfall, land surface temperature, surface

- soil moisture and groundwater storage over monsoon core region of India, *Arid Land Research and Management*. 37, 51-70, 2023. doi:10.1080/15324982.2022.2106323.
- [46] W. Ullah, K. Ahmad, S. Ullah, A.A. Tahir, M.F. Javed, A. Nazir, A.M. Abbasi, M. Aziz, A. Mohamed, Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region, *Heliyon*. 9, e13322, 2023. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e13322.
- [47] S. Ma, L.-J. Wang, L. Ye, J. Jiang, Vegetation restoration thresholds under different vegetation types and altitude gradients in the Sichuan-Yunnan ecological shelter, China, *Journal of Environmental Management*. 340, 117910, 2023. doi:10.1016/j.jenvman.2023.117910.
- [48] C. Ru, S.-B. Duan, X.-G. Jiang, Z.-L. Li, C. Huang, M. Liu, An extended SW-TES algorithm for land surface temperature and emissivity retrieval from ECOSTRESS thermal infrared data over urban areas, *Remote Sensing of Environment*. 290, 113544, 2023. doi:10.1016/j.rse.2023.113544.
- [49] Y. Chen, J. Yang, W. Yu, J. Ren, X. Xiao, J.C. Xia, Relationship between urban spatial form and seasonal land surface temperature under different grid scales, *Sustainable Cities and Society*. 89, 104374, 2023. doi:10.1016/j.scs.2022.104374.
- [50] A. Tariq, F. Mumtaz, M. Majeed, X. Zeng, Spatio-temporal assessment of land use land cover based on trajectories and cellular automata Markov modelling and its impact on land surface temperature of Lahore district Pakistan, *Environmental Monitoring and Assessment*. 195, 114, 2022. doi:10.1007/s10661-022-10738-w.
- [51] M. Zhang, A.-A. Kafy, P. Xiao, S. Han, S. Zou, M. Saha, C. Zhang, S. Tan, Impact of urban expansion on land surface temperature and carbon emissions using machine learning algorithms in Wuhan, China, *Urban Climate*. 47, 101347, 2023. doi:10.1016/j.uclim.2022.101347.
- [52] C. Wang, Z. Ren, Y. Dong, P. Zhang, Y. Guo, W. Wang, G. Bao, Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions, *Urban Forestry & Urban Greening*. 74, 127635, 2022. doi:10.1016/j.ufug.2022.127635.
- [53] X.D. Xiao, L. Dong, H. Yan, N. Yang, Y. Xiong, The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park, *Sustainable Cities and Society*. 40, 428-439, 2018. doi:10.1016/j.scs.2018.04.002.
- [54] W. Zhou, W. Yu, Z. Zhang, W. Cao, T. Wu, How can urban green spaces be planned to mitigate urban heat island effect under different climatic backgrounds? A threshold-based perspective, *Science of The Total Environment*. 890, 164422, 2023. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164422.
- [55] J. Ahmad, J.A. Eisma, Capturing Small-Scale Surface Temperature Variation across Diverse Urban Land Uses with a Small Unmanned Aerial Vehicle, *Remote Sensing*. 15, 2042, 2023. doi:10.3390/rs15082042.
- [56] Y.-I. Cho, D. Yoon, M.-J. Lee, Comparative Analysis of Urban Heat Island Cooling Strategies According to Spatial and Temporal Conditions Using Unmanned Aerial Vehicles(UAV) Observation, *Applied Sciences*. 13, 10052, 2023. doi:10.3390/app131810052.
- [57] K.A. Henn, A. Peduzzi, Surface Heat Monitoring with High-Resolution UAV Thermal Imaging: Assessing Accuracy and Applications in Urban Environments, *Remote Sensing*. 16, 930, 2024. doi:10.3390/rs16050930.





Improvement of bread kadayıf formulation with wheat germ addition and different fermentation methods

Ekme kadayıfı formülasyonunun ruşeym katkısı ve farklı fermantasyon yöntemleriyle geliştirilmesi

Zeliha Fidan¹ , Kübra Aktaş^{2,*} 

^{1,2} Karamanoğlu Mehmetbey University, Faculty of Applied Sciences, Department of Gastronomy and Culinary Arts, 70200, Karaman, Türkiye

Abstract

In this study, it was aimed to improve the functional properties of bread kadayıf. For this purpose, 30% of the wheat flour was replaced with wheat germ, and the samples were fermented in 3 different methods including active dry yeast, sourdough and chickpea yeast. Selected physical, chemical and sensorial properties were examined in the final samples. The use of chickpea yeast increased ash content, antioxidant activity, and total phenolic content. The amount of phytic acid reached higher values in the samples with wheat germ, but sourdough and chickpea yeast addition decreased phytic acid content both in the samples with and without germ. On the other hand, the mineral amounts of the samples (Ca, K, Fe, Zn) increased with wheat germ. When the sensory analysis results were examined, it was seen that the use of wheat germ did not have any negative effects on the bread kadayıf samples and active dry yeast added samples had higher overall acceptability scores compared to sourdough and chickpea yeast.

Keywords: Bread kadayıf, Chickpea yeast, Phytic acid, Sourdough, Wheat germ

1 Introduction

Consumer awareness has considerably ascended about healthy lifestyles and consumer demand for healthier products continues to increase worldwide. In this context, the largest market segment can be considered under the title of 'naturally healthy and fortified/functional' products [1]. On the other hand, recent researches on functional products have concentrated on traditional products as well as global products.

Desserts have always formed an important part of meals and have been served at special times and the desserts have been mentioned with high energy due to used ingredients [2]. Kadayıf is one of the most known desserts in Turkish cuisine and it can be defined as a sweet pastry with different types such as stuffed kadayıf, string kadayıf, bread kadayıf, künefe, white kadayıf, tray kadayıf, creamy kadayıf, palace wire kadayıf etc. The history of bread kadayıf dates back to earlier times as well as other kadayıf types. It is known that soldiers consumed bread kadayıf by pouring sherbet on dry stale breads during expeditions. The consumption of bread kadayıf has modified over time and reached today's

Özet

Bu çalışmada ekme kadayıfının fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla buğday ununun %30'u buğday ruşeymi ile yer değiştirmiş ve örnekler aktif kuru maya, ekşi maya ve nohut mayasını içeren 3 farklı yöntemle fermente edilmiştir. Nihai örneklerde bazı fiziksel, kimyasal ve duyuşsal özellikler incelenmiştir. Nohut mayasının kullanımı kül içeriğini, antioksidan aktiviteyi ve toplam fenolik madde miktarını arttırmıştır. Ruşeym içeren örneklerde fitik asit miktarı daha yüksek değerlere ulaşmış ancak ekşi maya ve nohut mayası ilavesi hem ruşeyimli hem de ruşeymsiz örneklerde fitik asit içeriğini azaltmıştır. Diğer taraftan, örneklerin mineral miktarları ise (Ca, K, Fe, Zn) ruşeym ile birlikte artış göstermiştir. Duyusal analiz sonuçları incelendiğinde, ruşeym kullanımının ekme kadayıfı örneklerinde herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığı ve aktif kuru maya ilaveli örneklerin ekşi maya ve nohut mayası ilaveli örneklere göre genel kabul edilebilirlik puanlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Ekme kadayıfı, Nohut mayası, Fitik asit, Ekşi maya, Ruşeym

industrial production level. It is notified that the used flour for bread kadayıf production should be suitable and the end product should be thin and of equal thickness on all sides [3].

The sourdough as a natural fermentation process has attracted attention again in the recent times due to additional health and nutritional benefits although nowadays industrially produced yeast and chemical yeast agents have been used [4]. Besides, high volume and shelf life, microbiologically safe product, and good sensory characteristics were aimed with sourdough utilization in bread-making technology [5]. Sourdough is produced with wheat flour and water but it can also be obtained from other flour sources that is, rye, oat, barley, corn, etc. and using of these another sources can be resulted with various nutritional values and organoleptic properties [5, 6]. For example, "chickpea yeast" is used in some regions such as Turkey, Macedonia and Greece, as a result of this, distinctive odour and taste are obtained in some bakeries. Chickpea yeast can be described as a filtrate from fermented mixture of coarsely grounded chickpea, salt and water. The fermentation is commonly applied at 37-40°C for 16-18 hours. The sponge

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kubraaktas@kmu.edu.tr (K. Aktaş)

Geliş / Received: 04.10.2024 Kabul / Accepted: 23.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1560845

which contains the filtrate, wheat flour and salt is used for “chickpea bread or bread with sweet ferment” [7]. The microbiota in sourdough is originated from fermented dough and especially lactic acid bacteria and yeasts are commonly dominant organisms. When the lactic acid and acetic acid concentration increase in the mixture, a sour taste is achieved. It was reported that decreasing the risk of some diseases such as colorectal cancer, cardiovascular disorders, diabetes, and obesity can be accomplished with sourdough products consumption [5, 6].

Wheat germ is one of the three important structures of whole wheat. This part is separated from endosperm and bran during milling process as a nutritious by-product. It may be considered as a concentrate source of essential amino and fatty acids, minerals, vitamins, tocopherols and phytosterols. Refined wheat flour and its derived cereal products are poor in point of micronutrients and dietary fiber. Recently most cereal based food products have been fortified with wheat germ for nutritional improvement. Nevertheless, some studies notified that using of germ in bread making showed some undesirable effect on the viscoelastic properties of dough and some methods as heating, fermentation and antioxidant addition have been suggested [8].

To the best of our knowledge there is very little information about bread kadayıf. To address this gap, the present study aimed to determine how wheat germ addition and different fermentation methods affect the quality characteristics of bread kadayıf samples.

2 Material and methods

2.1 Materials

Materials needed for the preparation of bread kadayıf samples; white wheat flour, sunflower oil, butter, eggs, refined table salt, granulated sugar, active dry yeast were obtained from local markets in Karaman. Chickpeas were purchased from a local legume retailer. Wheat germ was obtained from İngro Food Marketing, Turkey.

2.2 Sourdough fermentation

For sourdough fermentation, 20 g organic wheat flour, 20 g organic rye flour and 40 ml water were mixed homogeneously in a sterile container with a wooden spoon to avoid metal contact and left for 48 hours. Afterwards, 20 g of dough mixture was fed by mixing 20 g of organic rye flour, 20 g of organic wheat flour and 40 ml of water without metal contact, 3 times in a day for 15 days. At the end of 15 days, 10 g of the resulting sourdough was taken and 50 g of wheat flour and 50 ml of water were added and fed twice a day. Sourdough, fed for 30 days in total, was used in bread kadayıf [9].

2.3 Chickpea yeast fermentation

For chickpea yeast fermentation, 100 g of coarsely crushed chickpeas, 1 g of salt and 350 ml of warmed water (50 °C) were mixed with a wooden spoon and fermented in a jar in an oven at 40 °C for 16 hours [10]. The mixture obtained at the end of the fermentation was filtered to obtain chickpea yeast.

2.4 Bread kadayıf production

For the production of bread kadayıf, firstly the preliminary yeast was created and then the main dough mass was started. For the active dry yeast added sample, preliminary yeast was created using 16 g of flour, 6 g of active dry yeast and 70 ml of water and then left for 10 minutes. To create the main dough, 80 g eggs, 230 g flour, 100 ml water, 50 g butter and 1.5 g salt were added to the preliminary yeast and mixed in a mixer (Kitchen-aid, Artisan Series, Greenville, USA) until a homogeneous dough was obtained. The resulting dough was fermented at 30°C for 40 minutes, and then it was placed on a 30 cm diameter tray, kneaded with 30 g of oil and spread on the tray. The dough, which fermented for 30 minutes in the tray, was baked in a preheated oven (Bosch HGD52D120T, Istanbul, Turkey) at 200°C for 35 minutes. Before experimental evaluation, bread kadayıf samples were cooled for at least 1 hour. For the production of samples with wheat germ, 30% germ was used as a substitute for wheat flour. For the production of sourdough added samples, 92 g of sourdough was used instead of the preliminary yeast. For the production of chickpea yeast added samples, 70 ml of water in the preliminary yeast used in the active dry yeast added samples was replaced with 70 ml of chickpea yeast (filtrate) and the preliminary yeast was created with 22 g of flour (Table 1). As a result, bread kadayıf experiments were carried out with 3 different fermentation methods (FM), with and without wheat germ addition, in two replications (3x2)x2. Figure 1 exhibited the dry bread kadayıf produced with wheat germ and active dry yeast as a sample.



Figure 1. Dry bread kadayıf sample produced with wheat germ and active dry yeast

2.5 Physical and chemical properties

Color values (L^* value [(0) black-(100) white], a^* value [(+) red-(-) green] and b^* value [(+) yellow-(-) blue]) were determined using the Minolta CR-400 (Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japan) device.

Moisture, ash, crude protein and crude fat contents were determined according to AACC methods numbered 44-19, 08-01, 46-30 and 30-25 respectively [11].

In order to determine both the total phenolic content (TPC) and antioxidant activity, Wronkowska et al. [12]'s method has been modified. 1 g of the sample was shaken with 80% methanol water (10 ml) and centrifuged to obtain the supernatant.

Table 1. Ingredients of bread kadayıf samples

Bread Kadayıf Samples							
FM 1	Active dry yeast 92 g	wheat flour 230 g	-	egg 80 g	butter 50 g	oil 30 g	salt 1.5 g
FM 1	Active dry yeast 92 g	wheat flour 161 g	wheat germ 69 g	egg 80 g	butter 50 g	oil 30 g	salt 1.5 g
FM 2	Sourdough 92 g	wheat flour 230 g	-	egg 80 g	butter 50 g	oil 30 g	salt 1.5 g
FM 2	Sourdough 92 g	wheat flour 161 g	wheat germ 69 g	egg 80 g	butter 50 g	oil 30 g	salt 1.5 g
FM 3	Chickpea yeast 92 g	wheat flour 230 g	-	egg 80 g	butter 50 g	oil 30 g	salt 1.5 g
FM 3	Chickpea yeast 92 g	wheat flour 161 g	wheat germ 69 g	egg 80 g	butter 50 g	oil 30 g	salt 1.5 g

For TPC determination, 0.1 ml of the supernatant, 0.9 ml of distilled water, 1 ml of 10% diluted Folin-Ciocalteu reagent (Merck, Germany) and 2 ml of 10% sodium carbonate (Merck, Germany) solution were mixed. The mixtures were incubated for 1 hour at room temperature and in a place protected from light, and then the absorbance values were obtained on a spectrophotometer (Shimadzu UV-1800 UV / Visible Scanning Spectrophotometer; 115 VAC, US) at 765 nm. TPC is expressed in gallic acid equivalents.

2,2-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) method was used to determine the antioxidant activity of the samples. In analysis; 0.25 ml of DPPH solution and 2 ml of 80% methanol solution and 0.1 ml of extract were mixed and kept in a dark environment at room temperature for 20 minutes. At the end of the period, absorbance measurements of the samples were made on a spectrophotometer at 517 nm and the inhibition was calculated as the percentage.

To determine the amount of phytic acid in the samples, the method of Haug and Lantzsch [13] was used and colorimetric determination was made. For this purpose, the phytic acid in the samples was extracted with 0.2 N HCl and then ammonium iron (III) sulfate solution was added. The free iron in the serum was colored with bipyridine solution and the amount of phytic acid was determined by reading the absorbance value at 519 nm.

To determine the amounts of Ca, K, Fe and Zn elements in the samples, 1 g of dried sample was treated with sulfuric acid and kept for 24 hours. Then, the heated samples were bleached with hydrogen peroxide. The samples, diluted to 100 ml with pure water, were filtered and the mineral substance amounts were determined by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) (Agilent 720).

2.6 Sensory analyses

The bread kadayıfs produced in this study were equally sized (5x5 mm), soaked (100 ml water) and syruped (170 g sugar/200 ml water) for sensory evaluation and then samples encoded with three-digit numbers in random order were presented to the panelists. Sensory acceptability of samples was appraised by a trained panel of seven members. The samples were evaluated in terms of color, taste, odor, pore structure and overall acceptability. The evaluation was made using a scale between 1 and 7 (1: extremely bad, 2: very bad, 3: poor, 4: average, 5: good, 6: very good and 7: extremely good).

2.7 Statistical analysis

Statistical analysis with using JMP statistical program, version 5.0.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) was

applied to determine the differences between the analysis results of bread kadayıf samples. The data were subjected to analysis of variance, and mean comparison was conducted using Tukey HSD test for assessment effects of different fermentation methods (active dry yeast, sourdough and chickpea yeast) and mean comparison was performed using Student's t test for assessment of wheat germ effect. A significance level of 5% was accepted for all mean comparisons.

3 Results and discussions

3.1 Some physical and chemical properties of raw materials

Since the wheat flour used in the production of bread kadayıf is substituted with wheat germ, the physical and chemical analysis results of these raw materials were given in Table 2. L^* , a^* and b^* values of wheat flour and germ were 92.52, -0.40, 10.57 and 76.56, 1.50, 28.77 respectively. The color values of wheat flour are related to the flour yield obtained during the milling stage. It is also known that wheat variety and particle size are effective factors on flour color. As expected, wheat flour was found to have higher L^* and lower a^* and b^* values than wheat germ. Levent and Bilgiçli [14] produced cakes using coarse and fine wheat germ in their study and found the L^* values of wheat flour, coarse and fine wheat germ as; 94.8, 77.85 and 79.19, a^* values; 0.52, 1.59 and 1.12 and b^* values; 13.7, 29.09 and 28.01 respectively. On the other hand, when chemical content of raw materials is examined, it can be clearly said that wheat germ is superior to wheat flour. It has been reported in the literature that wheat germ contains three times more protein, seven times more fat and six times more minerals than wheat flour. It is also stated to be a rich source of vitamins, minerals, unsaturated fatty acids, free sugars and functional phytochemicals including ferulic acid, phytic acid, glutathione and phytosterols [15]. When ash, crude protein, crude fat contents of wheat flour were 0.46, 10.52, 1.34 g/100g respectively, these results were determined as 4.19, 26.32 and 11.20 g/100g for wheat germ.

Also, TPC, antioxidant activity and phytic acid values of the raw materials were significantly higher in wheat germ. The TPC, antioxidant activity and phytic acid values of wheat flour and wheat germ were 58.67 and 165.13 mg GAE/100g, 12.76% and 90.06% and 261.97 and 2127.24 mg/100g, respectively. Cankurtaran [16] drew attention to the phytic acid content of the parts removed by milling and stated that although the loss of phytic acid seems to be an advantage when it is considered as an antinutritional substance, it can be interpreted as a functional disadvantage

when the antioxidant property of phytic acid is taken into account. When the mineral content values of wheat germ and wheat flour were compared, it was seen that the mineral values of wheat germ had higher values than wheat flour. This is an expected result, as it is known that germ is a dense area in terms of mineral substances. Demirci [17] determined the Ca, Fe, K, P and Zn contents for wheat flour as 19.64, 1.53, 146.66, 209.99 and 1.38 mg/100g, while the amounts of the same minerals in wheat germ were 50.08, 10.37, 859.77, 924.36 and 14.72 mg/100g. The study stated that differences in the mineral content of both wheat flour and wheat germ may occur depending on the type of wheat from which they are obtained, the changes in the growing conditions of these wheat and the efficiency during the milling process.

Table 2. Physical and chemical properties of raw materials

	Wheat flour	Wheat germ
<i>L*</i>	92.52±1.26a	76.56±1.94b
<i>a*</i>	-0.40±0.06b	1.50±0.33a
<i>b*</i>	10.57±0.09b	28.77±2.30a
Moisture (g/100g)	11.33±0.01a	8.71±0.11b
Ash (g/100g)	0.46±0.01b	4.19±0.21a
Crude protein(g/100g)	10.52±0.23b	26.32±0.62a
Crude fat (g/100g)	1.34±0.38b	11.20±0.40a
TPC (mg GAE/100 g)	58.67±0.78b	165.13±1.55a
AA(Inhibition %)	12.76±0.13b	90.06±2.05a
Phytic acid (mg/100g)	261.97±1.10b	2127.24±3.04a
Ca(mg/100g)	33.75±0.93b	59.37±0.47a
K (mg/100g)	166.15±1.54b	865.55±1.04a
Fe (mg/100g)	0.20±0.01b	5.85±0.08a
Zn (mg/100g)	0.79±0.01b	9.10±0.02a

Means with the same letter are not statistically different from each other (p<0.05). TPC: Total phenolic content AA: Antioxidant activity

3.2 Color properties of bread kadayıf samples

*L**, *a** and *b** values of crust and crumb color of bread kadayıf samples were presented in Table 3. When the crust color values of bread kadayıf samples were evaluated in terms of fermentation methods, it was seen that sourdough generally increased *L** and *b** values in both samples with and without germ, but the *a** value was not affected by the fermentation methods. The addition of germ only caused an

increase in the *a** value in crust color, and the *L** and *b** values were not statistically affected by the addition of germ. Crust *L** and *b** values may vary depending on the content of the fermentation and also it is thought that wheat germ, which has high amino acid/sugar content, may have contributed to the Maillard reaction, causing the increment of *a** value in kadayıf samples.

Crumb *L** values of kadayıf samples varied between 52.15-65.13, crumb *a** values varied between -1.69-2.08 and *b** values varied between 20.21-26.40.

As in the crust *L** values, crumb *L** values increased in sourdough added samples both with and without germ, and the *a** value did not show a statistically significant difference with the change in fermentation methods. The addition of germ decreased the crumb *L** value, but had no significant (p<0.05) effect on the *b** value. Maybe it could be thought that sourdough could provide a higher crumb *L** value compared to active dry yeast and chickpea yeast as a result of feeding it only with wheat flour and water. On the other hand, it could be thought that the crust *a** value and crumb *L** value were affected by the addition of germ at the end of the baking process of the final product. Furthermore, the addition of germ might also mask the potential of color change of different fermentation methods in the final product.

Gómez et al. [18] produced bread with raw and processed wheat germ (0-10%) in their study and determined the *L**, *a** and *b** values of the samples without wheat germ as 58.96, 13.92 and 23.1, respectively, while these values were 49.89, 13.28 and 25.31 respectively in samples with 10% wheat germ added. They stated that wheat germ did not cause a significant change in color at the maximum rate expressed. In the study conducted by Yıldırım and Arıcı [19] the color characteristics of sourdough breads were monitored at different fermentation temperatures and it was stated that the most important difference was in the *a** values of the crust color.

3.3 Chemical properties of bread kadayıf samples

In order to determine the chemical composition of kadayıf samples, mineral content (Ca, K, Fe, Zn), TPC, antioxidant activity, phytic acid content as well as proximate analysis were investigated and the results were shown in Table 4, 5 and 6.

Table 3. Color properties of bread kadayıf samples

Fermentation method	<i>L*</i>		<i>a*</i>			<i>b*</i>		
	Without germ	wheat	With wheat germ	Without germ	wheat	With wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ
	Crust color							
Active dry yeast	48.27±1.53Ba		41.37±1.72Ca	7.75±0.66Ab		13.64±0.21Aa	29.43±2.21Ba	29.41±0.37Ca
Sourdough	64.38±1.84Aa		62.09±0.18Aa	7.20±1.20Ab		11.38±0.74Aa	37.85±0.55Aa	40.15±0.52Aa
Chickpea yeast	59.76±0.50Aa		57.15±1.03Ba	6.88±1.51Ab		14.04±1.07Aa	33.87±1.07ABa	35.34±0.78Ba
	Crumb color							
Active dry yeast	59.83±0.35Ba		53.60±0.47Bb	-1.69±0.05Ab		0.33±0.44Aa	20.21±0.23Ba	22.01±2.47Aa
Sourdough	65.13±0.49Aa		60.81±1.20Ab	0.69±1.22Aa		0.92±0.29Aa	25.73±2.06Aa	25.52±0.35Aa
Chickpea yeast	59.73±0.83Ba		52.15±0.91Bb	-0.33±0.04Ab		2.08±0.88Aa	23.47±0.15ABa	26.40±1.11Aa

Values followed by different lowercase letters within each row (indicating differences among average of bread kadayıf samples without or with wheat germ) and by different uppercase letters within each column (indicating differences among average of bread kadayıf samples with different fermentation methods) are significantly different at p<0.05.

Moisture content of samples were obtained in the range of 40.01-43.78 g/100g (Table 4) and these values were statistically similar to each other. On the other hand, the higher ash, protein and fat contents of wheat germ compared to wheat flour were reflected in the ash, protein and fat contents of the kadayıf samples. The ash, protein and fat contents ranged from 0.92, 10.65, 15.18 g/100g to 1.65, 14.73 and 18.60 g/100g respectively (Table 4). The different fermentation methods did not have statistically significant effect on the protein and fat contents but the ash content increased with chickpea yeast. It can be thought that the higher ash content of samples with chickpea yeast is due to the existing mineral content in the structure of chickpeas passes into the filtrate during the production of chickpea yeast.

TPC and antioxidant activity increased with wheat germ and chickpea yeast addition (Table 5). TPC values were between 31.26 and 42.28 mg GAE/100 g for samples without wheat germ and were between 56.56 and 82.77 mg GAE/100 g for samples with wheat germ. The antioxidant activity values increased more than three times thanks to the addition of wheat germ and the values varied between 7.99-36.15 %. The general opinion in the literature is that phenolic compounds in grains decrease as a result of thermal processes such as cooking. However, recent researches have found that cooking increases total phenolic acid and ferulic acid levels due to intense heat, which makes some phenolic compounds more bioaccessible. Furthermore, it has been reported that the bioaccessibility of phenolic acids increases with fermentation application. It has been stated that

enzymes produced by microorganisms during fermentation have the potential to release bound polyphenols and thus increase their bioaccessibility [20, 21]. On the other hand, it has been stated that different bacteria isolated from sourdough develop cellular defense by synthesizing antioxidant enzymes and develop protective properties against harmful radicals by synthesizing antioxidant exopolysaccharides [22]. The microorganism content, which differs with the use of chickpea yeast, and high phenolic content and antioxidant substance potential of chickpeas that will be able to pass into chickpea yeast may be increased the TPC and antioxidant activity in the samples compared to active dry yeast and sourdough fermentation. Liu et al. [23] investigated the phenolic content of fermented wheat germ for increasing time (12-72 hours) and reported that the TPC of fermented germ samples increased with increasing fermentation time. Mahmoud et al. [24] investigated the antioxidant properties of skimmed wheat germ in their study to transform wheat germ into a value-added product and stated that the reducing power of skimmed wheat germ extract against DPPH and ABTS radicals is as effective as BHA (butylated hydroxyanisole) and BHT (butylated hydroxytoluene).

Phytic acid content of samples increased with wheat germ and also phytic acid content of sourdough and chickpea yeast-added bread kadayıf samples were obtained close to each other for samples without and with wheat germ. The highest values were observed in kadayıf samples with active dry yeast (215.71-715.30 mg/100 g).

Table 4. Proximate analysis of bread kadayıf samples

	Moisture (%)		Ash (%)		Protein (%)		Fat (%)	
	Without wheat germ	With wheat germ	Without wheat germ	With Wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ
Fermentation method								
Active dry yeast	43.25±1.56Aa	42.73±1.54Aa	0.92±0.01Bb	1.52±0.02Ba	10.65±0.54Ab	13.01±0.19Aa	15.73±0.09Ab	17.63±1.21Aa
Sourdough	40.01±0.54Aa	41.17±0.84Aa	0.93±0.01Bb	1.53±0.01Ba	11.06±0.15Ab	12.89±0.56Aa	15.68±0.37Ab	18.21±0.28Aa
Chickpea yeast	42.22±0.74Aa	43.78±0.42Aa	1.17±0.01Ab	1.65±0.01Aa	11.95±0.45Ab	14.73±0.99Aa	15.18±0.13Ab	18.60±0.33Aa

Values followed by different lowercase letters within each row (indicating differences among average of bread kadayıf samples without or with wheat germ) and by different uppercase letters within each column (indicating differences among average of bread kadayıf samples with different fermentation methods) are significantly different at $p < 0.05$.

Table 5. Chemical properties of bread kadayıf samples

	Total phenolic content (mg GAE/100 g)		Antioxidant activity (Inhibition %)		Phytic acid (mg/100g)	
	Without wheat germ	With wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ
Fermentation method						
Active dry yeast	31.26±1.16Bb	56.56±1.73Ba	8.22±0.67Bb	28.45±0.67Ba	215.71±5.20Ab	715.30±4.10Aa
Sourdough	38.18±2.46Bb	68.00±3.46Ba	7.99±0.20Bb	29.78±0.66Ba	133.81±3.70Bb	579.90±5.52Ba
Chickpea yeast	42.28±1.18Ab	82.77±3.88Aa	11.63±0.94Ab	36.15±0.60Aa	122.71±1.66Bb	556.50±6.91Ba

Values followed by different lowercase letters within each row (indicating differences among average of bread kadayıf samples without or with wheat germ) and by different uppercase letters within each column (indicating differences among average of bread kadayıf samples with different fermentation methods) are significantly different at $p < 0.05$.

It is stated that wild yeast and lactobacilli present in sourdough neutralize phytic acid and facilitate the digestion of products. Sourdough fermentation is much more effective than yeast fermentation in reducing phytate content. By breaking down the phytate structure, the absorption of important minerals such as iron, zinc, magnesium found in sourdough bread increases [22]. Didar [25] reported that the phytic acid content decreased with the addition of more sourdough in pitas which containing different bacterial strains. Lopez et al. [26] compared the effect of yeast fermentation, sourdough fermentation and a mixture of these on the breakdown of phytic acid in their bread study. The results showed that the phytic acid content in breads produced by sourdough fermentation was reduced by up to 62%, whereas conventional yeast fermentation reduced it by only 38%.

Considering the mineral values of the samples, results were determined between 43.16-58.04 mg/100g for Ca, 190.93-397.95 mg/100g for K, 0.54-3.53 mg/100g for Fe and 0.97-2.87 mg/100g for Zn (Table 6). As expected, the addition of wheat germ occurred an increase in the mineral values of bread kadayıf samples. Sidhu et al. [27] reported that as a result of adding 10% and 20% germ to the bread formulation, the mineral content of bread samples increased significantly compared to the control, and this may be due to the fact that wheat germ has a rich content in minerals. On the other hand, Zn content was found to be higher in samples with active dry yeast and K content was found to be lower in samples with sourdough. The use of chickpea yeast increased the Ca and Fe contents. Hendek Ertop and Coşkun [28] investigated the possibilities of using dried chickpea sourdough in bread production and observed that the mineral content increased with the use of chickpea sourdough. They reported that this may be related to the content of chickpeas used in sourdough because chickpeas contain an average of 3% ash, 0.2% calcium and 0.3% phosphorus and are a rich source of minerals (Ca, P, Fe, Mg, K).

3.4 Sensorial properties of bread kadayıf samples

The results obtained in the sensory analysis of bread kadayıf produced without and with wheat germ were shown in Figure 2. First of all, it should be noted that the addition of wheat germ did not create a statistically significant difference in all

results compiled in the sensory analysis (data not shown). Therefore, this study showed that germ could be used up to 30% in the bread kadayıf formulation. The color scores of the samples varied between 4.20 and 6.00 and when examined in terms of fermentation methods, results in samples without wheat germ addition were not statistically different from each other. However, the use of sourdough resulted in lower color scores compared to the use of active dry yeast in samples with added wheat germ. Taste scores were higher in samples with active dry yeast (5.60-5.12) and the lowest scores in taste scoring were obtained with the use of chickpea yeast (3.04-2.78). Although it was observed that the odor scores decreased with the use of sourdough and chickpea yeast, it was determined that the method of fermentation did not create a statistically significant difference. When we look at the pore structure results, the samples made using active dry yeast without wheat germ (6.80) and with wheat germ (6.00) received the highest scores. While the samples with chickpea yeast received the lowest scores (3.00) in the samples without germ, there was no significant difference with the use of sourdough and chickpea yeast in the samples with germ. The bread kadayıf samples with active dry yeast (6.00-5.00) received the highest overall acceptability scores. In samples without germ, the use of sourdough and chickpea yeast, respectively, decreased the overall acceptability scores (4.50, 2.70). In the samples with wheat germ, the lowest overall acceptability scores were obtained with the use of chickpea yeast (3.38). Emirli [29] produced sourdough bread with 30% germ and the samples were compared with sensory analysis, scoring in the range of 1-5. Wheat breads was more appreciated than germ breads in terms of taste, crumb color and general appreciation, and both types of breads were evaluated with a score above 3. Rizzello et al. [30] used wheat germ fermented with sourdough in the production of wheat bread to improve its nutritional, texture and sensory properties. Considering the sensory analysis results, they found that the highest color and taste values (5.90 and 6.80 respectively) were seen in the bread with fermented wheat germ, followed by raw wheat germ bread (5.70 and 6.30) and control bread (2.90 and 5.30).

Table 6. Mineral content of bread kadayıf samples

	Ca		K		Fe		Zn	
	Without wheat germ	With wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ	Without wheat germ	With wheat germ
Fermentation method								
Active dry yeast	45.02±0.69Bb	49.20±0.40Ba	228.53±2.17Bb	397.95±2.37Aa	0.54±0.01Cb	1.63±0.01Ca	1.14±0.03Ab	2.87±0.01Aa
Sourdough	43.16±0.99Bb	49.70±0.09Ba	190.93±2.68Cb	359.86±1.96Ca	0.68±0.01Bb	2.32±0.04Ba	0.99±0.01Bb	2.50±0.03Ba
Chickpea yeast	50.77±0.41Ab	58.04±0.68Aa	252.16±1.07Ab	370.92±0.56Ba	1.92±0.01Ab	3.53±0.03Aa	0.97±0.01Bb	2.51±0.02Ba

Values followed by different lowercase letters within each row (indicating differences among average of bread kadayıf samples without or with wheat germ) and by different uppercase letters within each column (indicating differences among average of bread kadayıf samples with different fermentation methods) are significantly different at $p < 0.05$

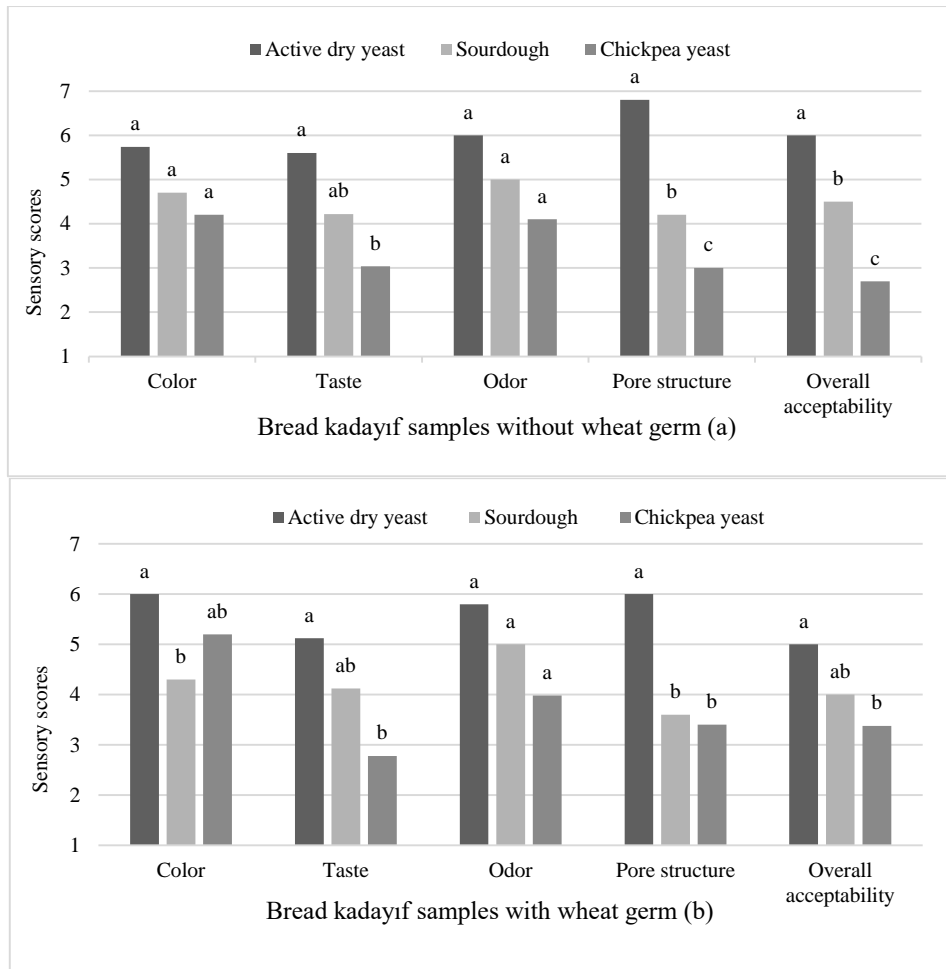


Figure 2. Sensorial properties of bread kadayıf samples a) without wheat germ b) with wheat germ (Values followed by different lowercase letters are significantly different at $p < 0.05$.)

4 Conclusions

This study demonstrated that wheat germ can be used up to 30% in bread kadayıf without negative sensory effects and chickpea yeast may enhance nutritional properties but did not create sufficient taste. The study provides valuable data for different functional bread kadayıf studies and future studies should investigate the long-term storage stability of bread kadayıf with different fermentation types and wheat germ. Wheat germ using with various stabilization techniques and more controlled conditions with different pure cultures to support fermentation should be examined.

Acknowledgement

This research was funded by the The Scientific Research Projects Coordination Unit of Karamanoğlu Mehmetbey University, grant number 06-YL-21.

The authors acknowledge the participants who supported to this study.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19%

The similarity rate of the article should be declared here.

References

- [1] M. Yu and S. Watson, Market overview of health and wellness food products. In: X. Du and J. Yang (eds) Flavor-associated applications in health and wellness food products. Springer, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51808-9_1
- [2] Y. Seçim and G. Uçar, Evaluation of the desserts; which are hosmerim, cheese halva, kunafah produced in Turkish cuisine-in aspect of tourism. International Journal of Social Sciences and Education Research, 3(5 S), 1478-1484, 2017. <https://doi.org/10.24289/ijsser.317678>
- [3] MEB, Ministry of Education Publications. Food and beverage services area, kadayıf types. Ankara, TURKEY, 2018. https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kaday%C4%B1f%20C3%87e%C5%9Fitleri.pdf

- [4] M. R. Canesin and C. B. B. Cazarin, Nutritional quality and nutrient bioaccessibility in sourdough bread. *Current Opinion in Food Science*, 40, 81-86, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.02.007>
- [5] H. A. Sakandar, R. Hussain, S. Kubow, F. A. Sadiq, W. Huang and M. Imran, Sourdough bread: A contemporary cereal fermented product. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(3), e13883. 2019. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13883>
- [6] M. Gobetti, M. De Angelis, R. Di Cagno, M. Calasso, G. Archetti and C. G. Rizzello, Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 103-113, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018>
- [7] H. Tangüler, Traditional Turkish fermented cereal based products: Tarhana, boza and chickpea bread. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 2(3), 144-149. 2014. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v2i3.144-149.111>
- [8] F. Boukid, S. Folloni, R. Ranieri and E. Vittadini, A compendium of wheat germ: Separation, stabilization and food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 120-133, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.001>
- [9] T. Dinç, Karakılıçık, ekşi mayaya dair her şey. İstanbul: Mutfak Kitap Yayınları. (Karakılıçık, everything about sourdough. İstanbul: Kitchen Book Publishing), 2019.
- [10] N. Şahin, M. Koyuncu and A. Sayaslan, Effects of chickpea yeast utilization on gluten-free bread. *Harran Journal of Agricultural and Food Science*, 513-524, 2018. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.382537>
- [11] AACC. American Association of Cereal Chemists, Approved methods of the AACC, The Association: St. Paul, MN, 2010.
- [12] M. Wronkowska, D. Zielińska, D. Szawara-Nowak, A. Troszyńska and M. Soral-Śmietana, Antioxidative and reducing capacity, macroelements content and sensorial properties of buckwheat-enhanced gluten-free bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(10), 1993-2000, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02375.x>
- [13] W. Haug and H. J. Lantzsch, Sensitive method for the rapid determination of phytate in cereals and cereal products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 34(12), 1423-1426, 1983. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740341217>
- [14] H. Levent and N. Bilgiçli, Quality evaluation of wheat germ cake prepared with different emulsifiers. *Journal of Food Quality*, 36(5), 334-341, 2013. <https://doi.org/10.1111/jfq.12042>
- [15] H. Levent, N. Bilgiçli and N. Ertaş, The assessment of leavened and unleavened flat breads properties enriched with wheat germ. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 321-326, 2015. <https://doi.org/10.3920/QAS2013.0341>
- [16] T. Cankurtaran, Effects of wheat bran and wheat germ additions on some quality properties of filled and unfilled fresh pasta. Master's Thesis, Necmettin Erbakan University, Institute of Science, Turkey, 2016. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [17] Ş. Demirci, A research on gevrek production with improved functional and nutritional properties by the addition of wheat germ and tarhana. Master's Thesis, Necmettin Erbakan University. Institute of Science, Turkey, 2022. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [18] M. Gómez, J. Gonzalez and B. Oliete, Effect of extruded wheat germ on dough rheology and bread quality. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2409-2418, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0519-5>
- [19] R. M. Yildirim and M. Arici, Effect of the fermentation temperature on the degradation of phytic acid in whole-wheat sourdough bread. *LWT*, 112, 108224, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.122>
- [20] N. M. Anson, E. Selinheimo, R. Havenaar, A. M. Aura, I. Mattila, P. Lehtinen, and G. R. Haenen, Bioprocessing of wheat bran improves in vitro bioaccessibility and colonic metabolism of phenolic compounds. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(14), 6148-6155, 2009. <https://doi.org/10.1021/jf900492h>
- [21] Ö. Çağındı, E. Köse and C. İnce, In vitro bioaccessibility and health effects of bioactive compounds in bread produced by sourdough fermentation. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(9), 1686-1694, 2021. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i9.1686-1694.3806>
- [22] E. Yılmaz and Z. Yüksel, Sourdough and some technological properties of sourdough bread and its effects on health. *The Journal of Food*, 750-771, 2023. <https://doi.org/10.15237/gida.GD23062>
- [23] F. Liu, Z. Chen, J. Shao, C. Wang and C. Zhan, Effect of fermentation on the peptide content, phenolics and antioxidant activity of defatted wheat germ. *Food*, (20), 141-148, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.10.002>
- [24] A. A. Mahmoud, A. A. Mohdaly and N. A. Elneairy, Wheat germ: an overview on nutritional value, antioxidant potential and antibacterial characteristics. *Food and Nutrition Sciences*, 6(2), 265, 2015. <https://doi.org/10.4236/fns.2015.62027>
- [25] Z. Didar, Effect of sourdough on phytic acid content and quality of iranian sangak bread. *Journal of Nutrition & Food Science*, 1(115), 2011. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000115>
- [26] H. W. Lopez, V. Krespine, C. Guy, A. Messenger, C. Demigne and C. Remesy, Prolonged fermentation of whole wheat sourdough reduces phytate level and increases soluble magnesium. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, (49), 2657-2662, 2001. <https://doi.org/10.1021/jf001255z>

- [27] J. S. Sidhu, S. N. Al-Hooti, J. M. Al-Saqer and A. Al-Othmn, Studies on the development of pan bread using raw wheat germ. *Journal of Food Quality* 24(3), 235-247, 2001. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2001.tb00605.x>
- [28] M. Hendek Ertop and Y. Coşkun, Shelf-life, physicochemical, and nutritional properties of wheat bread with optimized amount of dried chickpea sourdough and yeast by response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(7), e13650, 2018. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13650>
- [29] Ç. Emirli, Sensory evaluation of sour bread produced with the addition of different grain flours. Master's Thesis, İstanbul Ayvansaray University, Institute of Graduate Programs, Turkey, 2021. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [30] C. G. Rizzello, L. Nionelli, R. Coda, R. D. Cagno and M. Gobbetti, Use of sourdough fermented wheat germ for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of the white bread. *European Food Research and Technology*, 230, 645-654, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1204-z>





Transfer öğrenme kullanılarak geri dönüşüm atıklarının sınıflandırılması

Classification of recycling waste using transfer learning

Büşra Betül Çavuşoğlu¹ Hasan Badem^{2,*}

^{1,2} Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş Türkiye

Öz

Günümüzde artan sanayileşme ve nüfus, atık sayısının artması sebep olmuştur. Dolayısıyla atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçleri büyük bir önem kazanmaktadır. Geliştirilmiş nesne atık tespit sistemleri; atıkların doğru bir şekilde sınıflandırılmasını, geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğini artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, geri dönüşümlü atıkların nesne tespiti için transfer öğrenme temelli YOLOv8 kullanılmıştır. YOLO yönteminin başarısının değerlendirmek için YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x ve RT-DETR modelleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deney sonuçlarında en etkin olan modelin YOLOv8n olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, önerilen modelde atık görüntüsü, video veya web kamerası kullanılarak gerçek zamanlı olarak sınıflandırılma gerçekleştirilmiştir. Modelleme için 7963 farklı görüntü kullanılmıştır. Eğitilmiş olan model ile geri dönüşümü hedeflenen sıklıkla kullanılan Batarya, Şişe Kapağı, Karton, Çöp Poşeti, Cam Şişe, Plastik Poşet, Plastik Şişe ve Teneke nesnelere tespit edilebilmektedir. Önerilen yöntem ile geri dönüşüm atık nesnelere %86.6 ortalama doğruluk oranı (mAP) ile tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: YOLO, Atık yönetimi, Transfer öğrenme, Nesne atık tespiti, Çevresel sürdürülebilirlik

1 Giriş

Atıklar, çağımızın en önemli çevresel sorunlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde hızla artan nüfus, sanayileşme ve tüketim alışkanlıklarının da etkisiyle atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi önemli bir problem haline gelmiştir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Uluslararası Katı Atık Birliği (ISWA) tarafından 2024 yılında ortaklaşa hazırlanan bir rapora göre dünya çapında her yıl iki milyar tondan fazla kentsel katı atık üretildiği hesaplanmıştır. 2050'ye kadar ise 3.8 milyar tona çıkacağı tahmin edilmektedir [1]. Bu atıklar, doğru atık yönetimi ve geri dönüşüm faaliyetleri olmadan doğrudan ve dolaylı yollarla çevresel dengenin bozulmasına ve iklim değişikliğine yol açabileceği düşünülmektedir. Özellikle yanlış yönetilen atıklar, çevreye zararlı gazların atmosfere salınmasına yol açar ve bu da sera etkisiyle doğrudan iklim değişikliğine neden olabilmektedir [2].

Aynı zamanda atıklar ve kötü atık yönetimleri ülkeleri sosyal ve ekonomik olarak etkilemektedir [3, 4]. Bu süreçte atıkların doğru bir şekilde sınıflandırılması ve geri dönüşüm süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, çevresel

Abstract

Nowadays, increasing industrialization and population have caused an increase in the amount of waste. Thus, waste management and recycling processes have gained great importance. Improved object waste detection systems play an important role in the correct classification of waste and in increasing the efficiency of recycling processes. In this study, transfer learning based YOLOv8 was used for object detection of recyclable waste. YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x and RT-DETR models have been used to evaluate the success of the YOLO. In the experimental results, YOLOv8n was the most effective model is observed. In addition, real-time classification has been implemented by using waste images, video or webcam in the proposed model. 7963 different images were used for modeling. The trained model can detect frequently used objects including Battery, Bottle Cap, Cardboard, Garbage Bag, Glass Bottle, Plastic Bag, Plastic Bottle and Box. In the proposed method, recycling waste objects have been detected with an average accuracy rate (mAP) of 86.6%.

Keywords: YOLO, Waste management, Transfer learning, Object waste detection, Environmental sustainability

kaynakların korunmasına ve atıkların azaltılması sürecinde çok önemlidir. Ancak, el ile yapılan fiziksel atık sınıflandırma süreci, oldukça zahmetli, zaman alıcı ve pek çok hatalara açık bir süreçtir [5,6].

Bu zorluğu aşmak için son zamanlarda yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojileriyle desteklenen otomatik nesne atık tespit sistemleri geliştirilmektedir [7, 8]. YOLOv8 ve RT-DETR algoritması, nesnelere görüntü, video ya da gerçek zamanlı, hızlı ve yüksek doğrulukta tespit edilmesini sağlayan bir nesne algılama algoritmalarıdır. Bu nedenle önerilen yöntemde, transfer öğrenme temelli YOLOv8 mimarisi kullanılmıştır. YOLOv8 mimarisi üzerinde geliştirilmiş olan YOLOv8'in YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x modelleri ve RT-DETR modelini eğiterek en yüksek doğruluğa sahip model YOLOv8n olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilen sistem ile resim, video ve gerçek zamanlı video stream üzerinden geri dönüşüm atıklarının sınıflandırılması amaçlanmıştır.

Literatür taraması sonucunda, bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran özellikler;

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hbadem@ksu.edu.tr. (H. Badem)

Geliş / Received: 25.06.2024 Kabul / Accepted: 24.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1504730

- YOLO'nun en yeni sürümlerinde birini kullanıyor olması. YOLOv8 ile atık tespitinde yapılan az çalışmanın olması
- Hem resim, hem video hem de gerçek zamanlı bir şekilde atık tespiti yapabilmesi.
- Şu ana kadar az sayıda örneği olan fazla çeşitlilikte sınıfa sahip olması ve yüksek doğrulukta olmasıdır.
- Web tabanlı entegrasyonu ile geniş bir kullanıcı kitlesine erişim sağlamak ve atık yönetimi süreçlerinin etkinliğini artırmaktadır.

2. bölümde literatür taraması, 3. Bölümde kullanılan materyal ve önerilen yöntem, 4. Bölümde ise deneysel sonuçlara yer verilmiştir. Son bölümde ise çıkarımlar ve ileriki çalışmalardan bahsedilmiştir.

2 Literatür özeti

Günümüzde YOLO algoritmaları kullanılarak yapılan birçok atık tespit çalışması bulunmaktadır;

Çelik vd. [9] 2023 yılında YOLOv3 derin öğrenme algoritması kullanarak İHA görüntülerinden gerçek zamanlı çevresel atık tespiti yapmışlardır. Pet ve cam şişelerden oluşan 2 sınıflı ve 2250 görüntüden oluşan veri setleri vardır. Veri setlerini %70 eğitim, %30 test verisi olmak üzere ayırmışlardır. Bu çalışmada ortalama doğruluk değeri (mAP) 0.84816 elde edilmiştir.

Kusurini vd. [10] tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada ise YOLOv4 ve YOLOv4-tiny derin öğrenme algoritmaları kullanarak atık nesne tespiti ve sınıflandırması çalışması yapılmıştır. Veri setleri, cam, metal, kağıt ve plastik olmak üzere 4 sınıftan oluşmaktadır. Verisetin de 3870 atık görüntüsü bulunmaktadır. Çalışma giriş olarak resim, video ve web kamerası gibi 3 farklı girişi kullanılmıştır. YOLOv4'ün nesne tespiti için YOLOv4-tiny'ye göre daha iyi performans gösterdiğini, ancak hesaplama hızı açısından YOLOv4-tiny'nin skorlarının daha iyi olduğu rapor edilmiştir. Modelin en iyi ortalama doğruluk değeri (mAP) ise %89.59'dır.

Erin vd. [11] tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada ise gerçek zamanlı atık tespiti amaçlanmıştır. Atıklar, 3D kamera kullanılarak tespit edilip, türüne göre görüntünün 3D konumu ve merkezi belirlenmiştir. Bu çalışmada YOLOv4 algoritması kullanılmıştır. Kağıt, metal, cam ve plastik olmak üzere 4 farklı atık sınıfı ve 1974 örneklem bulunmaktadır. Modelin ortalama doğruluk değeri 0.9571'dir.

Demir vd. [12] çalışmasında YOLOv4 algoritması ile su altında çöp tespiti için YOLOv4 tabanlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Su altında bulunan plastik şişe, cam şişe ve plastik paket ve büyük plastik bidon nesnelere ait görüntüler toplanarak bir veri seti oluşturmuşlardır. Dört nesne türü için toplamda 720 sualtı görüntüsü toplanmıştır. 720 görüntü içerisinde 962 nesne mevcuttur. Bu görüntüleri Labellmg programı kullanılarak etiketlemişlerdir. Bu çalışmada 2 farklı Train ve Test ayırma yöntemi kullanmışlardır; 80:20 eğitim test ve 90:10 eğitim test. Bu ayırma yöntemlerinin ortalama doğruluk değerleri (mAP) sırasıyla %88.7 ve %75.8'dir.

Jiang vd. [13] YOLOv5s modeli ile gerçek zamanlı bir kırsal evsel çöp tespit sistemi yapmışlardır. Bu çalışmada çöpün türü ve büyüklüğünün tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Veri seti çevrimiçi toplama, evsel çöplerin videoya çekimi ve kırsal alanlardan çöp görüntüleri alınarak oluşturulmuştur. Bu görüntülerden toplam on üç atık sınıfı elde edilmiştir ve toplam 7671 örneklem bulunmaktadır. Eğittikleri model ile tek bir çöp görüntüsünü %96.4 tespit doğruluğuyla ve 0.021 saniyede tespit edilebilmektedir.

Flores tarafından yapılan [14] gerçekleştirilen çalışmada, YOLOv5'e temelli bir atık tespit ve sınıflandırma modeli önerilmiştir. Çalışmada cam, metal, plastik, kağıt, karton ve çöp olmak üzere 6 sınıf bulunmaktadır. Çalışmada 2527 görselden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Eğitilen model ile %90.2 doğruluk, %91.6 geri çağırma ve %95.2 ortalama hassasiyet (mAP) değerleri elde edilmiştir.

Chen vd. [15] yaptıkları çalışmada su kaynaklarındaki atık tespiti için bir model önerilmiştir. Özellikle su yüzeyinde olan atıkların insansız araçlarla atık sınıflandırması yapılmasını hedeflemişlerdir. Çalışmada YOLOv5 algoritması kullanılmıştır. Orca veri seti üzerinde doğrulanmıştır. Modelin eğitim sonucunda YOLOv5'in mAP değerinin %84.9'a, hassasiyetin %88.7'ye ulaşılmıştır.

Pan vd. [16] Çin'de atık yönetimini geliştirmeye yardımcı olacak bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada YOLOv8 algoritmasını kullanarak çöp sınıflandırması yapan akıllı çöp kutusu geliştirmişlerdir. 4 kategoriye sahip yaklaşık 10.000 özel çöp veri seti kullanılmıştır. Ortalama doğruluk değeri (mAP) %100'e yakın çıkmıştır.

Shukhratov vd. [17] yaptıkları çalışmada plastik atıkların videolar üzerinde tespitini yapmışlardır. Bu çalışmada Faster R-CNN, RetinaNet ve YOLOv8 olmak üzere 3 farklı nesne algılama modelleri kullanılmıştır. Eğitimler sonucunda YOLOv8'in diğer modellerden daha iyi sonuç verdiği ve ortalama doğruluk değeri (mAP) %95.67 gözlenmiştir.

Panmuang vd. [18] yaptığı çalışmada Tayland'da Bangkok'un kentsel alanlarındaki CCTV kameralarından gelen 1383 görüntüyü YOLOv5n, YOLOv6n, YOLOv7 ve YOLOv8n'den oluşan YOLO versiyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, YOLOv5n'in sınıfları %94.50 doğrulukla sınıflandırabildiğini, sırasıyla %93.80 ile YOLOv8n, %71.60 ile YOLOv6n ve %24.60 ile YOLOv7 sonuç verdiğini rapor edilmiştir. Bu çalışmada YOLOv8 modeli hem hız hem de doğruluk bakımından önceki versiyonlarından daha iyi performans verdiğini göstermektedir.

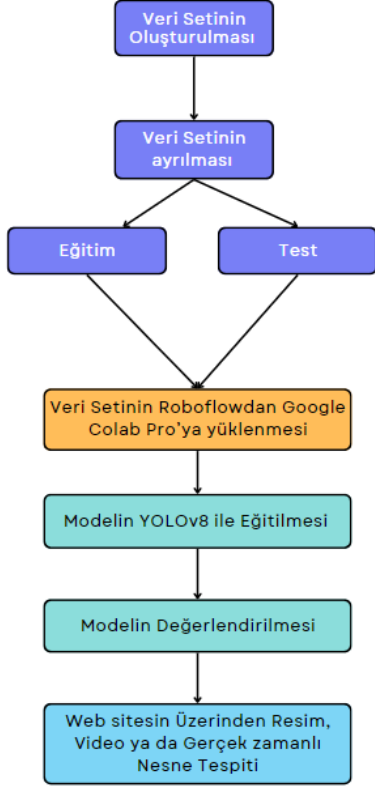
Zhu vd. [19] 2024 yılında yaptıkları çalışmada insansız hava araçlarının (İHA) tespiti için iki İHA veri seti kullanılmıştır. İlk veri setinde 1360 adet İHA görüntüsü bulunurken, ikinci veri setinde ise 5238 eğitim görüntüsü, 1345 doğrulama görüntüsü ve 678 test görüntüsünden oluşmaktadır. YOLOv7, YOLOv8, RT-DETR ve Gold-YOLO'un farklı sürümleri ile iki veri seti üzerinden modelleme gerçekleştirilmiştir. RT-DETR yöntemi her iki İHA veri seti üzerindeki doğruluğunun sırasıyla %95.6 ve %97.8'e ulaşarak en yüksek doğruluğa sahip olduğunu rapor edilmiştir.

3 Materyal ve metod

Bu bölümde sırasıyla atık sınıflandırması için kullanılan YOLOv8 ve RT-DETR nesne tespit algoritmaları, veri seti,

performans değerlendirilmesinde kullanılan metrikler, önerilen yöntem ve web entegrasyona yer verilmektedir.

Atık nesnelere sınıflandırılması için YOLOv8 tabanlı önerilen sistemin işlem akışı modeli Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Önerilen sistemin işlem akışı modeli

3.1 YOLOv8

YOLOv8, Ocak 2023'te Ultralytics [20] tarafından piyasaya sürülen açık kaynaklı bir nesne algılama modelidir. YOLO algoritmasının 8. Sürümüdür. Bilgisayarlı görme ve derin öğrenme alanlarında kullanılmaktadır. Doğruluk ve hız açısından yüksek performans sunmaktadır.

YOLO'nun açılımı "You Only Look Once" (Yalnızca Bir Kez Bak) dır. Bir resimde, videoda ya da gerçek zamanda gördüğü nesnelere hızlı ve tek seferde algılayıp tanıyan bir yapay zeka teknolojisidir [21].

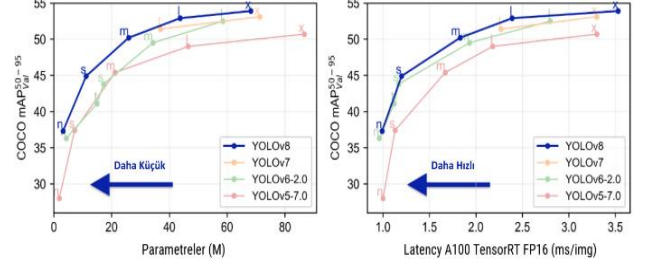
Şekil 2'de görüldüğü üzere YOLOv8'i önceki sürümlerine göre parametre sayısı ile performans arasındaki başarımlar daha yüksektir. Bu nedenle hesaplama süresi görece daha düşüktür.

YOLOv8, nesne tespiti (object detection) ve takibi (tracking), örnek segmentasyonu (instance segmentation), görüntü sınıflandırması (image classification) ve poz tahmini (pose estimation) problemleri için ön eğitilmiş bir teknolojidir [23]. Bu çalışmada atık nesne tespiti için transfer öğrenme temelli YOLOv8 mimarisi kullanılmıştır.

YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l ve YOLOv8x nesne tespiti için özelleştirilmiş versiyonlardır. Bu yöntemlerin karşılaştırması Tablo 1’de sunulmuştur.

Atık nesne tespiti için veri seti ile YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l ve YOLOv8x modelleri eğitilmiştir.

Modelleme sonucunda en yüksek doğruluğa sahip olan YOLOv8n modelinin olduğu görülmektedir. Web tabanlı uygulama da eğitilmiş YOLOv8n mimarisi kullanılmıştır



Şekil 2. YOLO versiyonlarının performans karşılaştırması [22]

Tablo 1. YOLO nesne tespit modelleri [24]

Model	Boyut (Piksel)	mAP val 50-95	Hız CPU ONNX (ms)	Hız A100 Tensor RT (ms)	Parametreler (M)	FLOP'lar (B)
YOLO v8n	640x640	37.3	80.4	0.99	3.2	8.7
YOLO v8s	640x640	44.9	128.4	1.20	11.2	28.6
YOLO v8m	640x640	50.2	234.7	1.83	25.9	78.9
YOLO v8l	640x640	52.9	375.2	2.39	43.7	165.2
YOLO v8x	640x640	53.9	479.1	3.53	68.2	257.8

3.2 YOLOv8 mimarisi

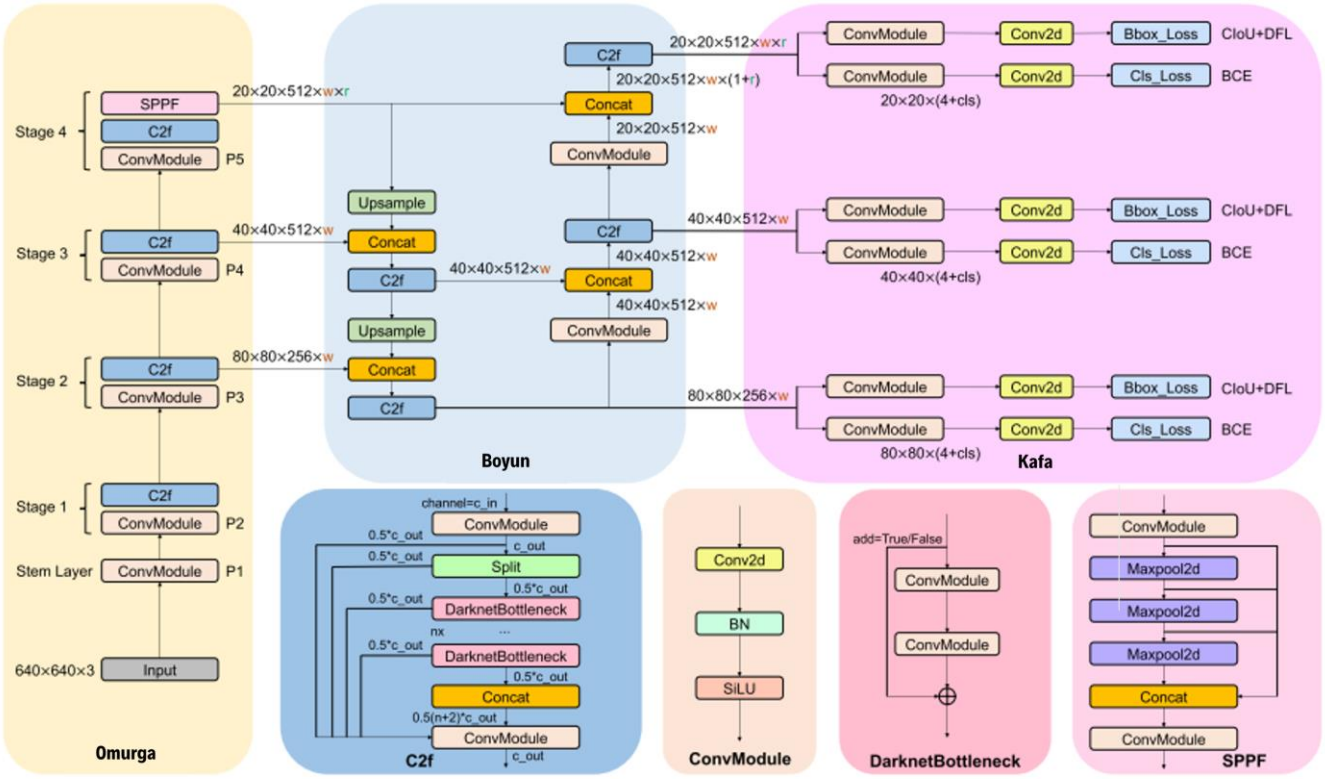
YOLOv8 mimarisi 3 ana bileşenden oluşmaktadır. Omurga (Backbone), Boyun (Neck), Kafa (Head) [25].

Omurga (Backbone): Görüntüdeki özellik çıkarma işleminden sorumludur. Omurga evrimsel sinir ağı (Convolutional neural network) katmanlarından oluşmaktadır. Bu katmanlar girdi olarak aldığı görüntüyü kenarlar, köşeler ve dokular gibi temel özelliklerini çıkarmaktadır. YOLOv8, omurgası olarak Darknet'in bir versiyonu olan CSPDarknet53'ü kullanılmaktadır [26].

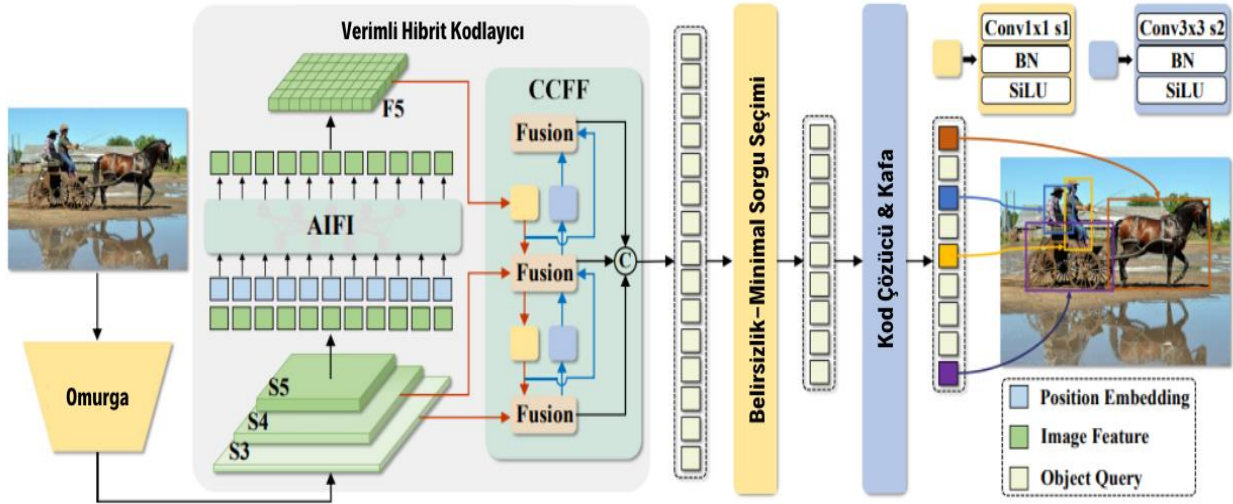
Boyun (Neck): Omurga ve kafa arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Omurgadan gelen özellik bilgilerini alıp işler ve özellik hatalarını toplar. YOLOv8'de bu kısım, FPN (Feature Pyramid Network) veya PANet (Path Aggregation Network) yapılarının kullanımı ile gerçekleştirilmektedir [26].

Kafa (Head): YOLOv8 algoritmasındaki işleğin son kısmıdır. Nesne algılama ve sınıflandırma işlemi bu aşamada gerçekleştirilir. Bu bölümde Omurgada olduğu gibi evrimsel sinir ağı mimarisine yer verilmektedir. Bu katmanlar ızgara yapısı (srid structure) ve konum bilgisi (bounding boxes) yapılarını kullanarak nesne tahmini gerçekleştirilmektedir [26].

Şekil 3'te Genel YOLOv8 mimari modeli sunulmuştur [27].



Şekil 3. YOLOv8 mimarisi



Şekil 4. RT-DETR mimarisi [28]

3.3 RT-DETR

Gerçek Zamanlı Algılama Dönüştürücüsü (Real-Time Detection Transformer (RT-DETR)) modeli, Yi Liu vd. [28] tarafından önerilmiştir. RT-DETR modeli 2024 yılında geliştirilen ve gerçek zamanlı performans sağlayan bir nesne tanıma algoritmasıdır.

RT-DETR mimarisi 3 temel özellikten oluşmaktadır. Bunlar:

1. Verimli Hibrit Kodlayıcı:

RT-DETR, ölçek içi etkileşimi ve ölçekler arası füzyonu ayrıştırarak çok ölçekli özellikleri işleyen verimli bir hibrit kodlayıcı kullanır. Bu tasarım, hesaplama maliyetlerini

düşürür ve gerçek zamanlı nesne tespiti performansını artırır [28].

2. IoU Farkındalıklı Sorgu Seçimi:

RT-DETR, IoU (Intersection over Union; IoU farkındalı Sorgu Seçimi) farkındalıklı sorgu seçimi kullanarak nesne sorgularından sorumludur. Bu yaklaşım, modelin sahnedeki en alakalı nesnelere odaklanmasını sağlar, böylece algılama doğruluğunu önemli ölçüde artırır [28].

3. Uyarlanabilir Çıkarım Hızı:

RT-DETR, farklı kod çözücü katmanları kullanarak çıkarım hızının esnek bir şekilde ayarlanmasını destekler. Bu uyarlanabilirlik, yeniden eğitime gerek kalmadan çeşitli gerçek zamanlı nesne algılama senaryolarında pratik uygulamayı kolaylaştırmaktadır [28]. RT-DETR mimarisini Şekil 4'te görülmektedir.

3.4 Veri seti

Bu çalışmada kullanılan veri seti, görüntü işleme projelerinde veri seti oluşturma, yönetme, veri etiketleme gibi işlemleri yapmamızı sağlayan yaygın kullanılan bir platform olan Roboflow [29] kullanılarak oluşturulmuştur. Roboflow web sitesi üzerinde var olan etiketlenmiş 25 farklı veri seti [30-54] problemimiz ile ilgili görüntüler seçilerek büyük bir seti elde edilmiştir. Elde edilen veri seti [55] de sunulmuştur.

Toplamda 7963 resim içeren veri seti, 8 sınıftan oluşmaktadır. Veri setinde olan sınıflar örneklem sayıları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Veri seti atık sınıfları ve örneklem sayıları

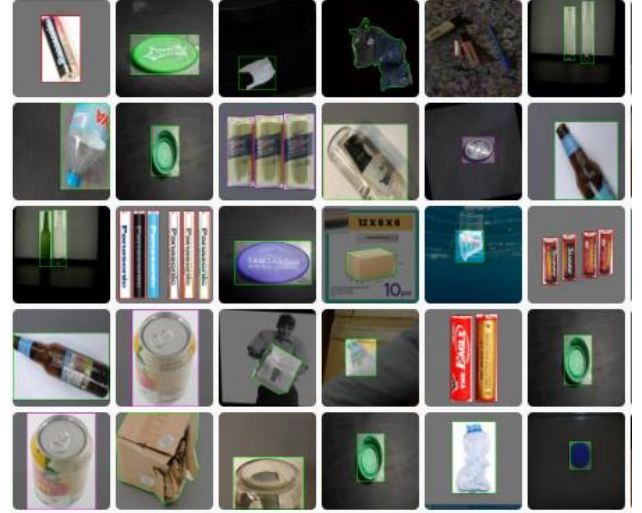
Atık Sınıfları	Sayı
Batarya	988
Şişe Kapağı	928
Karton	851
Çöp Poşeti	713
Cam Şişe	1049
Plastik Poşet	889
Plastik Şişe	1274
Teneke	1243

Veri setinde bulunan sınıflara ait bazı örnek görseller Şekil 5'te görülmektedir.

Veri setinde bulunan sınıflar günümüzde en yaygın bilinen malzemelerden seçilmiştir. Veri seti Tablo 3'te de görüldüğü üzere Train (Eğitim) ve Test olarak ayrılmıştır. Veri seti %80 eğitim, %20 test klasörlerine ayrılmıştır.

Tablo 3. Veri seti eğitim ve test örneklem dağılımı

Train (Eğitim) Seti	Test Seti
6363	1600



Şekil 5. Veri setinden örnek görüntüler

3.5 Kullanılan metrikler

Bu çalışmada, geliştirilen nesne tespit sisteminin performansını değerlendirmek için literatürde yaygın kullanılan metrikler tercih edilmiştir. Bu metrikler; F1 Skor, Keskinlik (Precision), Geri Çağırma (Recall) ve Keskinlik-Geri Çağırma (Precision-Recall) eğrisidir. Aşağıda bu metriklerle ait denklemler ve açıklamalara yer verilmiştir.

Modelin performansını değerlendirmek için kullanılan bu metrikler Doğru Pozitif (TP), Yanlış Pozitif (FP), Doğru Negatif (TN) ve Yanlış Negatif (FN) değerleri kullanılarak tanımlanmaktadır [56].

F1 Skor eğrisi, Keskinlik ve Geri Çağırma'nın ağırlıklı ortalamasıdır. Formülü;

$$F1\ Skor = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (1)$$

Keskinlik (Precision) eğrisi, eğitilen modelin yaptığı pozitif tahminlerin toplam pozitif tahmine oranını karşılık gelmektedir.

$$Keskinlik\ (Precision) = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Geri Çağırma (Recall) eğrisi, eğitilen modelin gerçek pozitifleri tahminlerinin TP ve FN nin toplamına oranına karşılık gelmektedir.

$$Geri\ Çağırma\ (Recall) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

Keskinlik-Geri Çağırma (Precision-Recall) eğrisi, özellikle sınıflar arasında dengesizlik olduğunda model performansını değerlendirmek için kullanılan bir grafikdir. Bu eğri, modelin Keskinlik (Precision) ve Geri Çağırma (Recall) metriklerini çeşitli eşik değerlerinde gösterir. X eksen, Geri çağırma (Recall); Y eksen, Keskinlik (Precision) değerlerini göstermektedir.

3.6 Model eğitimi

Bu çalışmada, modelleme işlemini Google Colab Pro [57] kullanılarak gerçekleştirildi. Google Colab Pro, Google'ın sunduğu özellikle veri bilimi, derin öğrenme ve makine öğrenmesi alanlarında kullanılan bir platformdur. Modelleme için dağıtık çalışan bulut CPU ve GPU'lar sunmaktadır. Veri setimizi ise Roboflow'un bize sağladığı API ile Google Colab Pro'ya YOLOv8 ile koşturulmuştur.

Veri seti YOLOv8'in nesne tespiti için derin öğrenme modelleri olan YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x sürümleri ve RT-DETR üzerinden eğitilmiştir. Tüm modellerde eğitim süreci, toplam 50 epoch boyunca gerçekleştirilmiş olup, her bir epoch'ta görüntüler 640x640 piksel boyutuna yeniden boyutlandırılmıştır. Eğitim süresince F1 skor eğrisi, Keskinlik eğrisi, Keskinlik-Geri Çağırma eğrisi ve Geri Çağırma eğrisi gibi modelin performans metrikleri görselleştirilmiştir. Eğitimler sonucunda elde edilen değerler Tablo 7'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde eğitilen modeller içerisinde en yüksek doğruluğa sahip model ortalama doğruluk değeri (mAP) 0.866 ile YOLOv8n olduğu görülmektedir. Bu nedenle atık nesne tespit sistemi için YOLOv8n modelinin daha uygun olduğu değerlendirilmektedir.

3.6.1 Kullanılan parametreler

Modelin eğitimi sırasında Epochs (Dönem sayısı): 50 ve Görüntü boyutu (Image size): 640x640 piksel olarak ayarlanmıştır. Bu boyut, yeterli detay seviyesini korurken, hesaplama maliyetini makul seviyede tutmak amacıyla tercih edilmiştir.

Eğitim süreci, 50 epoch boyunca devam etmiştir. Bu süreçte model, her epoch'ta eğitim setindeki tüm görüntüleri kullanarak öğrenme işlemini gerçekleştirmiştir.

Modelin eğitim sürecinde **batch size** olarak her iterasyonda 16 örnek kullanılmıştır (batch=16). Bu, modelin parametre güncellemeleri için her adımda 16 görüntü üzerinden hesaplama yapmasını sağlamıştır. Ayrıca, optimizasyon algoritması **auto** olarak belirlenmiştir (optimizer=auto). Bu ayar, en uygun optimizasyon algoritmasının otomatik olarak seçilmesini sağlamış ve modelin daha etkili bir şekilde öğrenmesi amaçlanmıştır. Ek olarak veri setine Auto-Orient işlemi uygulanarak görüntülerin meta verilerine göre otomatik olarak doğru yöne döndürülmesi sağlanmıştır. Bu sayede model eğitimi ve tahminlerinde daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

3.7 Geliştirilen modelin web uygulama entegrasyonu

Geliştirilen yapay zeka modelini, son kullanıcı hizmetine sunabilmek için web tabanlı uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen web uygulaması ve eğittiğimiz YOLOv8n modelinin entegrasyonu bu alt bölümlerde sunulmuştur.

3.7.1 Kullanılan teknolojiler

Web tabanlı entegrasyon sürecinde aşağıdaki teknolojiler kullanılmıştır:

Backend: Flask, Python 3.10
Frontend: HTML, CSS, JavaScript
Model: YOLOv8n (best.pt)

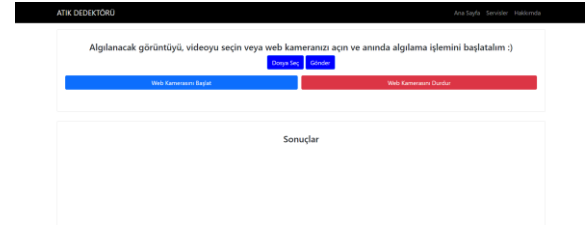
Flask, Python tabanlı bir web uygulama geliştirme ortamı olup, hızlı ve kolay bir şekilde uygulama geliştirmeye olanak tanımaktadır. HTML, CSS ve JavaScript ise frontend geliştirme için kullanılmıştır. HTML yapıyı oluştururken, CSS stil vermek için ve JavaScript etkileşimli unsurlar için kullanılmıştır.

Ortam: Pycharm Editör

Web tabanlı atık tespit sistemi arayüz görüntüleri Şekil 6 ve Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 6. Atık sınıflandırma web sitesi Ana Sayfa bölümü



Şekil 7. Atık sınıflandırma web sitesi Servisler bölümü

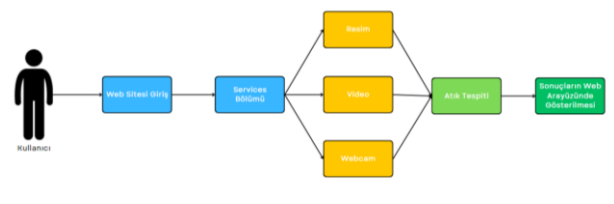
Ana Sayfa Bölümü: Kullanıcıların uygulamaya giriş yaptığı ilk karşılarına çıkan bölümdür.

Servisler Bölümü: Kullanıcıların fotoğraf yüklemesi, video yüklemesi veya web kamerasını kullanarak gerçek zamanlı görüntü yakalaması için bir arayüz.

3.8 Önerilen yöntem

Bu çalışma kapsamındaki Yolov8 tabanlı nesne atık tespit sistemi, atık yönetiminde önemli bir yenilikçi adımı temsil etmektedir. Bu çalışma aynı zamanda hem akademik hem de pratik anlamda atık yönetimi süreçlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Yolov8 tabanlı bu sistem, hem kullanıcıların atık sınıflandırma sürecini kolaylaştırmakta hem de geri dönüşüm endüstrisindeki verimliliği artırarak çevreye olan olumlu etkileri güçlendirmeyi hedeflemektedir.

Önerilen yöntemin uygulama mimarisi Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Uygulama mimarisi

4 Deneysel sonuçlar

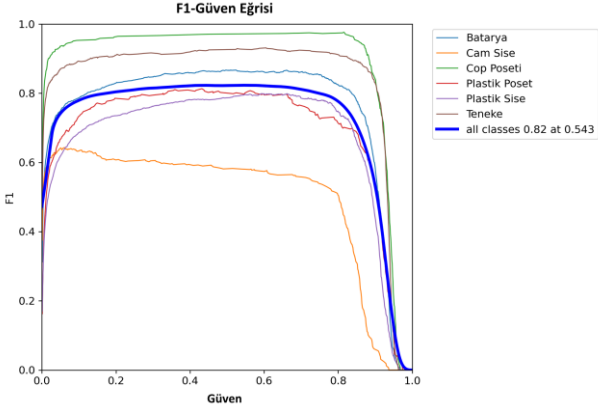
4.1 Model optimizasyonu ve değerlendirme

YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x sürümleri ve RT-DETR üzerinden gerçekleştirilen eğitim süreci tamamlandıktan sonra, modelin performansı Test veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. Elde edilen doğruluk değerleri Tablo 4 de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, en yüksek ortalama doğruluk değeri (mAP) 0,866 ile YOLOv8n'den elde edilmiştir.

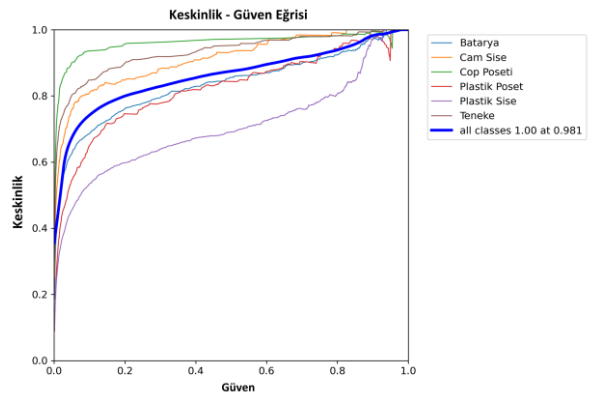
Tablo 4. Veri seti üzerinde eğitilen Yolov8 ve RT-DETR modellerinin doğruluk oranları

Nense Tespit Modelleri	Doğruluk
YOLOv8n	%86.6
YOLOv8s	%86.4
YOLOv8m	%85.4
YOLOv8l	%85.9
YOLOv8x	%85.7
RT-DETR	%85.8

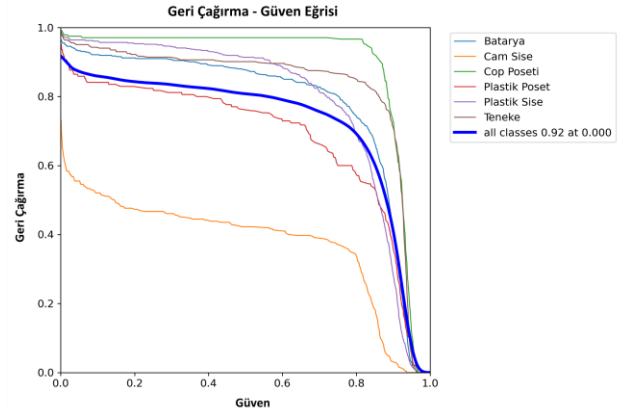
YOLOv8n temelli önerilen yöntemin performans analizi değerlendirilebilmesi için eğitilen modelden elde edilen F1 skor eğrisi, Keskinlik (Precision) eğrisi, Geri Çağırma (Recall) eğrisi ve Keskinlik-Geri Çağırma (Precision-Recall) eğrisi hesaplanarak sırasıyla Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 9. F1 skor eğrisi

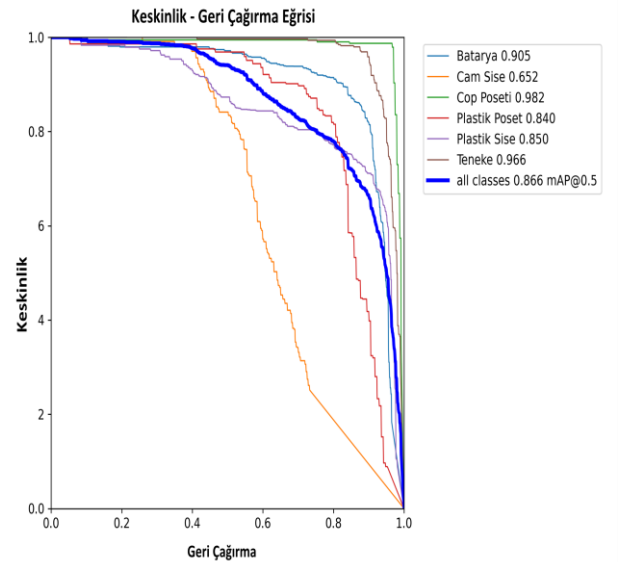


Şekil 10. Keskinlik (Precision) eğrisi



Şekil 11. Geri Çağırma (Recall) eğrisi

Tablo 5'te F1 skor eğrisi, Keskinlik (Precision) eğrisi, Geri Çağırma (Recall) eğrisi ve Keskinlik-Geri Çağırma (Precision-Recall) eğrisinin performans metriklerinin sayısal değerlerini rapor edilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde F1 skoru için 0.82 değeri elde edilmiştir. Bu veri modelin hem hassas hem de duyarlılığının yüksek olduğu bilgisini vermektedir. Precision oranımız mutlak tam sonucuna ulaşılmıştır. Bu veri modelimizin bir sınıfı doğru olarak tahmin etmede son derece kesin ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Recall değeri ise 0.92 olarak hesaplanmıştır. Keskinlik-Geri Çağırma değeri ise 0.866 olduğu görülmektedir. Bu değerlerin yüksek olması, modelimizin dengeli ve iyi bir performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 12. Keskinlik-Geri Çağırma (Precision-Recall) eğrisi

Tablo 5. Performans metriklerinin sayısal değerleri

F1 Skor	Keskinlik	Geri Çağırma	Keskinlik-Geri Çağırma
0.82	1.0	0.92	0.866

Geliştirilen sistemin genel olarak değerlendirilebilmesi için karmaşıklık matrisi hazırlanarak Şekil 13'te rapor edilmiştir.



Şekil 13. Karmaşıklık matrisi

Şekil 13'te modelimizin Test veri setinde değerlendirilmesi sonucu oluşan Karmaşıklık Matrisi verilmiştir. Şekil incelendiğinde, model cam şişe verilerini ve plastik poşet olarak hatalı tahmin etti görülmektedir. Diğer tüm geri dönüşüm atıklarının neredeyse hatasız tahmin edebildiği anlaşılmaktadır. Şekil genel olarak değerlendirildiğinde oldukça yüksek doğru tahmin değeri elde edildiği görülmektedir.

4.2 K-Kat çapraz doğrulama ile değerlendirme

Modelin kararlılığını değerlendirmek ve veri setine olan bağlı olmadan performansını değerlendirme amacıyla YOLOV8n modeline K-kat çapraz doğrulama (K-fold cross validation) yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, veri kümesini eşit büyüklükteki K alt kümelere ayırarak, modelin her bir katı üzerinde eğitim ve test edilmesini sağlamaktadır. Böylece, modelin genel performansı farklı veri parçaları üzerinde ölçülmüş ve aşırı öğrenme (overfitting) riski azaltılmıştır. Çalışmamızda K değeri olarak 5 seçilmiş olup, her kat için model performansını ve ortalama performans ile

kayıpları sunulmuştur. Uygulanan K-kat çapraz doğrulama yönteminde kullanılan parametreler: batch = 16 ve epoch=50 ve K=5 olarak ayarlanmıştır.

K kat çapraz doğrulama uygulandıktan sonra her katmandaki oluşan keskinlik, geri çağırma, mAP50 ve mAP50-95 sonuçları Tablo 6'da rapor edilmiştir. Tüm bu katmanların ortalaması ve standart sapmaları ise Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 6. Önerilen yöntemin K-kat çapraz doğrulama sonuçları

Model Performansı (Her kat için)	Keskinlik	Geri Çağırma	mAP50	mAP50-95
Kat 1	0.9306	0.9159	0.9506	0.8243
Kat 2	0.9557	0.9264	0.9606	0.8463
Kat 3	0.9724	0.9754	0.9860	0.9024
Kat 4	0.9711	0.9486	0.9749	0.8834
Kat 5	0.9837	0.9803	0.9907	0.9043

Tablo 7. Ortalama performans ve kayıplar

Metrik	Ort.	Stad. Sapma
Keskinlik	0.9627	0.0184
Geri Çağırma	0.9493	0.0256
mAP50	0.9726	0.0151
mAP50-95	0.8722	0.0317
Eğitim Kaybı	0.0013	0.0016
Doğrulama Kaybı	1.9411	0.5497

Geliştirilen sistemin modellenmesinin de 25 farklı veri seti birleştirilerek kapsamlı bir veri kaynağı oluşturulmuştur. Literatür araştırmalarında kullanılan veri setlerinden bir kısmının birleştirildiği veya sadece tekil kullanım modelleri rapor edilmiştir. Bu nedenle adil bir karşılaştırma yapılabilecek rakip modeller bulunamamıştır. Fakat, geliştirilen modelin literatüre göre başarımının da değerlendirilebilmesi adına Tablo 8 hazırlanmıştır. Bu tablo incelendiğinde örnek sayısı olarak en yakın rakibe göre yaklaşık 2 katı örneklem kullanıldığı ve 4 farklı sınıfta modele eklendiği görülmektedir. Ayrıca en kapsamlı sınıf adetinde de bizim çalışmamızda yer verildiği görülmektedir. Bahsedilen sınırlılıklar dikkate alındığında %86.6 ile oldukça yüksek bir doğruluk değeri elde edildiği görülmektedir.

Tablo 8. Önerilen Yöntemin literatür ile karşılaştırılması

Referans	Metod	Sınıf	Örneklem Sayısı	Doğruluk Skoru
Çelik vd. [9]	YOLOv3	Pet ve Cam	2250	%84.8
Kusrini vd. [10]	YOLOv4	Cam, Metal, Kağıt ve Plastik	3870	%89.59
Erin vd. [11]	YOLOv4	Kağıt, Metal, Cam ve Plastik	1974	%95.7
Flores [14]	YOLOv5	Cam, Metal, Plastik, Kağıt, Karton ve Çöp	2527	%95.2
Shukhratov vd [17]	Faster R-CNN, RetinaNet ve YOLOv8	Cam, Plastik, Kağıt, karton, Metal ve Çöp	1900	%95.67
Panmuang vd. [18]	YOLOv5n, YOLOv6n, YOLOv7 ve YOLOv8n	Çöp Kutusu ve Çöp	1383	%93.80
Önerilen Yöntem	YOLOv8n	Batarya, Şişe Kapağı, Karton, Çöp Poşeti, Cam Şişe, Plastik Poşet, Plastik Şişe, Teneke	7963	%86.6
Önerilen Yöntem	RT-DETR	Batarya, Şişe Kapağı, Karton, Çöp Poşeti, Cam Şişe, Plastik Poşet, Plastik Şişe, Teneke	7963	%85.8



Şekil 14. Önerilen yöntemin test veri seti üzerinden örnek sınıflandırma tahminleri

Geliştirilen geri dönüşüm atıklarının sınıflandırılması sistemine ait birkaç örneklem ait sınıflandırma tahminleri Şekil 14’te sunulmuştur.

Şekil 15’te ise geliştirilen sınıflandırma modelinin web entegrasyonu üzerinden bir çalışma örneği sunulmuştur.



Şekil 15. Web uygulama üzerinden atık tespiti

5 Sonuç

Bu çalışmada derin öğrenme tabanlı transfer öğrenme ile geri dönüşüm atıklarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Modelin başarısını artırmak için 25 farklı veri setinin görüntüleri birleştirilerek büyük bir veri seti elde edilmiştir. Modelleme sürecinde nesne tespitten etkin olan YOLOv8n modeli kullanılmıştır. Bu çalışma ile atık sınıflandırmada insan gücüne dayalı ayrıştırma sürecine alternatif otonom bir model ortaya koyulmuştur. Bu çalışma atık yönetimi ve geri dönüşüm alanında alternatif yöntemlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. İleriki çalışmalarda geri dönüşüm ayrıştırma kurumlarında gerçek zamanlı robotik sistemlere entegre sistemler geliştirilebilir. Paralel tahmin modelleri ortaya koyulabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 9

Kaynaklar

[1] United Nations Environment Programme, Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of

waste – Turning rubbish into a resource. Nairobi, 2024.

<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>.

[2] U.S. Environmental Protection Agency, Global Greenhouse Gas Emissions Data, 2019. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-overview>.

[3] Department of Environment, Science and Innovation, Queensland, Economic Impacts, WetlandInfo website, 2021.

<https://wetlandinfo.des.qld.gov.au/wetlands/management/pressures/litter-illegal-dumping/effects-values/economic-impacts.html>.

[4] N. Ferronato ve V. Torretta, Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues, International Journal of Environmental Research and Public Health, 16 (6), 1060, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>.

[5] J. Bobulski ve M. Kubanek, Deep learning for plastic waste classification system, Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2021, 6626948, 7 sayfa, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6626948>.

[6] N. Nnamoko, J. Barrowclough ve J. Procter, Solid waste image classification using deep convolutional neural network, Infrastructures, 7, 47, 2022. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040047>.

[7] BBC Türkçe, Yapay zeka atıkları azaltmak ve geri dönüşümü artırmak için nasıl kullanılabilir? <https://www.bbc.com/turkce/articles/cn0k40m2ndjo>.

[8] Recycleye, <https://recycleye.com/>. Accessed 24 June 2024

[9] A. Altınörs ve S. Çelik, YOLOv3 derin öğrenme algoritması ile İHA görüntülerinden çevresel atık tespiti, International Journal of Innovative Engineering Applications, 7 (1), 76-85, 2023. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1195428>.

[10] K. Andhy Panca Saputra ve K. Kusriani, Waste object detection and classification using deep learning algorithm: YOLOv4 and YOLOv4-tiny, Turkish Journal of Computer and Mathematics Education

- (TURCOMAT), 12 (14), 1666–1677, 2021. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i14.10504>.
- [11] K. Erin, B. Bingöl ve B. Boru, YOLO – Based waste detection, Journal of Smart Systems Research, 3 (2), 120-127, 2022.
- [12] K. Demir ve O. Yaman, A YOLOv4-based method for underwater litter detection, International Informatics Congress (IIC2022) (Haz.), ss. 354-361, 2022.
- [13] X. Jiang, H. Hu, Y. Qin ve diğ., A real-time rural domestic garbage detection algorithm with an improved YOLOv5s network model, Sci Rep, 12, 16802, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20983-1>.
- [14] E. J. C. Flores, A YOLOv5s Model for classification of garbage, Southeast Asian Journal of Science and Technology, 8 (1), 9-18, 2023. <https://sajst.org/online/index.php/sajst/article/view/285>.
- [15] L. Chen ve J. Zhu, Water surface garbage detection based on lightweight YOLOv5, Sci Rep, 14 (1), 6133, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55051-3>.
- [16] S. Pan, N. Wang, Y. Lin ve J. Tang, Based on YOLOV8 intelligent trash can garbage classification detection algorithm, Mathematical Modeling and Algorithm Application, 2 (1), 28-32, 2024. <https://doi.org/10.54097/67mska34>.
- [17] I. Shukhratov, A. Pimenov, A. Stepanov, N. Mikhailova, A. Baldycheva ve A. Somov, Optical detection of plastic waste through computer vision, Intelligent Systems with Applications, 22, 200341, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200341>.
- [18] M. Panmuang ve C. Rodmorn, Garbage detection using YOLO algorithm for urban management in Bangkok, WSEAS Transactions on Computer Research, 12, 236-243, 2024. <https://doi.org/10.37394/232018.2024.12.23>.
- [19] M. Zhu ve E. Kong, Multi-scale fusion uncrewed aerial vehicle detection based on RT-DETR, Electronics, 13 (8), 1489, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13081489>.
- [20] Ultralytics, <https://www.ultralytics.com/tr>. Accessed 24 June 2024.
- [21] J. Terven, D. Córdova-Esparza ve J. Romero-González, A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS, Machine Learning and Knowledge Extraction, 5 (4), 1680–1716, Kasım 2023. <https://doi.org/10.3390/make5040083>.
- [22] Ultralytics. <https://docs.ultralytics.com/tr/models/yolov8/>. Accessed 24 June 2024.
- [23] Supported Tasks and Modes. <https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/#supported-tasks-and-modes>. Accessed 24 June 2024.
- [24] Ultralytics. <https://docs.ultralytics.com/tr/models/yolov8/#performance-metrics>.
- [25] YOLOv8 Architecture: A Deep Dive into its Architecture. <https://yolov8.org/yolov8-architecture/>. Accessed 24 June 2024.
- [26] B. Yu, S. Li, W. Wang ve diğ., The DCN-BiFPN Object Detection Algorithm based on YOLOv8, 14 Mart 2024, PREPRINT (Versiyon 1), Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4019974/v1>.
- [27] R.-Y. Ju ve W. Cai, Fracture detection in pediatric wrist trauma X-ray images using YOLOv8 algorithm, Scientific Reports, 13, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47460-7>.
- [28] Y. Zhao, W. Lv, S. Xu, J. Wei, G. Wang, Q. Dang, Y. Liu ve J. Chen, DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection, arXiv. <https://arxiv.org/abs/2304.08069>.
- [29] Roboflow. <https://roboflow.com/>. Accessed 24 June 2024.
- [30] YOGI TRI A., Kardus Packing Dataset, Roboflow Universe, Kasım 2023. <https://universe.roboflow.com/yogi-tri-a/kardus-packing/dataset/2>. Accessed 24 June 2024.
- [31] packagedetection, package-detection Dataset, Roboflow Universe, Aralık 2023. <https://universe.roboflow.com/packagedetection/package-detection-kt9ut/dataset/2>.
- [32] YOGI TRI A., Box Carton Package Detection Dataset, Roboflow Universe, Kasım 2023. <https://universe.roboflow.com/yogi-tri-a/box-carton-package-detection/dataset/6>. Accessed 24 June 2024.
- [33] Chris Adam, Digital Capsx27;ule memories Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. <https://universe.roboflow.com/chris-adam-b9cuh/digital-caps-ule-memories/browse?queryText=&pageSize=50&startIndex=0&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [34] bottle cup detection, bottle cap color detection Dataset, Roboflow Universe, Ekim 2023. <https://universe.roboflow.com/bottle-cup-detection-gnira/bottle-cap-color-detection/dataset/9>. Accessed 24 June 2024.
- [35] AleksPilot, BottleI DEDataset, Roboflow Universe, Mayıs 2023. https://universe.roboflow.com/alekspilot-kvgn4/bottle_ide/dataset/4. Accessed 24 June 2024.
- [36] dogcat, glass bottle Dataset, Roboflow Universe, Şubat 2024. <https://universe.roboflow.com/dogcat-nlhtn/glass-bottle-juhvb/dataset/1>. Accessed 24 June 2024.
- [37] HTW Berlin University of Applied Sciences, plasticandglass Dataset, Roboflow Universe, Haziran 2023. <https://universe.roboflow.com/htw-berlin-university-of-applied-sciences/plasticandglass/browse?queryText=&pageSize=200&startIndex=200&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [38] Beach Cleaning Robot, Glass detection Dataset, Roboflow Universe, Aralık 2023. <https://universe.roboflow.com/beach-cleaning-robot/glass-detection->

- momkc/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=0&browseQuery=true. Accessed 24 June 2024.
- [39] Arun Kumar, plastic Annotations Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. <https://universe.roboflow.com/arun-kumar-wnuph/plastic-annotations/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=0&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [40] DenisWang, bottletest03Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. https://universe.roboflow.com/deniswang/bottle_test03/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=0&browseQuery=true. Accessed 24 June 2024.
- [41] bottles, Bottles Dataset, Roboflow Universe, Ocak 2024. <https://universe.roboflow.com/bottles-t9lzo/bottles-ramni/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=0&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [42] klasifikasi, botol 350 Dataset, Roboflow Universe, Nisan 2024. <https://universe.roboflow.com/klasifikasi-ghgpr/botol-350/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=200&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [43] BEproject, BE Dataset, Roboflow Universe, Ocak 2024. <https://universe.roboflow.com/beproject-ontnq/be-m6kyc/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=200&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [44] Project, Plastic object detection USING YOLOV8 Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. <https://universe.roboflow.com/project-mwpp7/plastic-object-detection-using-yolov8/dataset/1>. Accessed 24 June 2024.
- [45] MTU1, MTU1projectDataset, Roboflow Universe, Ocak 2024. https://universe.roboflow.com/mtu1-iu57z/mtu_1_project/dataset/1.
- [46] garbage bag, trashbag finder Dataset, Roboflow Universe, Nisan 2023. <https://universe.roboflow.com/garbage-bag/trashbag-finder/dataset/2>. Accessed 24 June 2024.
- [47] SnapCycleV2, Batteries Dataset, Roboflow Universe, Temmuz 2023. <https://universe.roboflow.com/snapcyclev2/batteries-ephqt/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=400&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [48] ngoc411, battery Dataset, Roboflow Universe, Ocak 2024. <https://universe.roboflow.com/ngoc411/battery-bgk7x/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=0&browseQuery=true>.
- [49] project-anaaa, battery Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. <https://universe.roboflow.com/project-anaaa/battery-jrr08/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=0&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [50] ELAKKIYA E., Plastic Litter Detection Dataset, Roboflow Universe, Ocak 2024. <https://universe.roboflow.com/elakkiya-e-qijt0/plastic-litter-detection-yl09a/dataset/3>. Accessed 24 June 2024.
- [51] mins workspace, ObjectDetectiondrinkDataset, Roboflow Universe, Ekim 2023. https://universe.roboflow.com/mins-workspace/objectdetection_drink/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=200&browseQuery=true. Accessed 24 June 2024.
- [52] YoloV8, SolidWasteClassifier Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. <https://universe.roboflow.com/yolov8-erigx/solidwasteclassifier/browse?queryText=&pageSize=200&startingIndex=800&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [53] varyrecycle, can Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. <https://universe.roboflow.com/varyrecycle/can-cwf4o/browse?queryText=class%3Acan&pageSize=200&startingIndex=200&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [54] SnapCycle, SnapCycle Dataset, Roboflow Universe, Ağustos 2023. <https://universe.roboflow.com/snapcycle/snapcycle/br-owse?queryText=class%3Ametal-can&pageSize=200&startingIndex=400&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [55] Waste Detector, Cardboard-BottleCap-GlassBottle-PlasticBottle-PlasticBag-GarbageBag-Battery-Tin Dataset, Roboflow Universe, Haziran 2024. <https://universe.roboflow.com/waste-detector-2t9ly/cardboard-bottlecap-glassbottle-plasticbottle-plasticbag-garbagebag-battery-tin/browse?queryText=class%3Anull&pageSize=50&startingIndex=0&browseQuery=true>. Accessed 24 June 2024.
- [56] Karadağ, C., & Özdemir, D. (2023). Comparative analysis of deep learning methods for brain tumor detection. *Artificial Intelligence Studies*, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.30855/AIS.2023.06.01.01>
- [57] Google Colaboratory Pro. <https://colab.research.google.com>. Accessed 24 June 2024.





Sistem tanımlama yöntemi kullanılarak çeyrek araç süspansiyon sisteminin dinamik modelinin tahmini

Estimation of dynamic model of quadrant vehicle suspension system using system identification method

Murat Çatalakaya^{1,*} 

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 46100, Kahramanmaraş, Türkiye

Öz

Araçların hareket halinde karşılaştıkları titreşimler, konfor ve güvenlik açısından olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu titreşimlerin bastırılmasında, yol tutuşu ve yolcu konforu için süspansiyon sistemleri kritik bir role sahiptir. Bu çalışmada, araç dinamiği araştırmalarında yaygın olarak kullanılan çeyrek araç süspansiyon modeli üzerine, sistemin dinamik davranışını doğru ve verimli şekilde temsil eden bir sistem tanımlama yaklaşımı geliştirilmiştir. İlk olarak, çeyrek araç süspansiyon sisteminin matematiksel hareket denklemleri oluşturulmuş ve Matlab-Simulink ortamında modellenmiştir. Farklı yol senaryoları bu modele uygulanarak zaman verileri toplanmıştır. Ardından, elde edilen veriler Auto Regressive with Exogenous Inputs (ARX), Output Error (OE), Box Jenkins (BJ) ve Autoregressive Moving Average with Exogenous Input (ARMAX) gibi sistem tanımlama yöntemlerine tabi tutulmuş ve sistemin matematiksel transfer fonksiyonu modeli çıkarılmıştır. Son olarak ise bu modeller doğrulama kriterlerinden ve testlerinden geçirildikten sonra en uygun uyum sağlayan model, sistemi tanımlayan model olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, ARMAX modeli süspansiyon dinamiğini en iyi temsil eden model olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Süspansiyon sistemi, Dinamik model, Sistem tanımlama, MATLAB, Simulink

1 Giriş

Araç süspansiyon sistemi, aracın yol tutuşu, viraj alma ve konfor yeteneklerini kontrol eden kritik bir bileşendir [1]. Bu bileşen araç gövdesini, yolun tümseklerinden ve titreşimlerinden ayırarak, bu etkilerin insan vücuduna geçmesini engellemektedir [2]. Araç konforu, yol tutuşu, sürüş kabiliyeti ve güvenliği otomotiv endüstrisinde önemli faktörler olduğundan, zorlu yol koşullarıyla başa çıkabilecek daha kaliteli bir süspansiyon sistemi tasarlamak ve geliştirmek önemlidir. Temel bir araba süspansiyon sisteminin yapısı genellikle üç ana bileşenden oluşur. Bunlar: Helezon yaylar, amortisörler ve bir kaldıraç koludur [3]. Bu bileşenlerden oluşan süspansiyon sistemleri pasif (mekanik) süspansiyon olarak adlandırılır [4]. Pasif süspansiyonun yapısı oldukça basittir ancak çalışma verimliliği yüksek değildir. Bu sistemde araç gövdesinin salınımlarını tamamen pasif bir şekilde kontrol edilmektedir.

Abstract

The vibrations that vehicles experience in motion have a negative impact on comfort and safety. Suspension systems play a critical role in suppressing these vibrations for road holding and passenger comfort. In this study, a system identification approach that accurately and efficiently represents the dynamic behaviour of the system has been developed based on the quarter car suspension model, which is widely used in vehicle dynamics research. Firstly, the equations of motion of the quarter car suspension system were generated and modelled in the Matlab-Simulink environment. Different road scenarios were applied to this model and time data were collected. The data obtained were then subjected to system identification methods such as Autoregressive with Exogenous Inputs (ARX), Output Error (OE), Box Jenkins (BJ) and Autoregressive Moving Average with Exogenous Input (ARMAX) and the mathematical transfer function model of the system was derived. Finally, after subjecting these models to validation criteria and tests, the model that provided the best fit was selected as the model to describe the system. As a result, the ARMAX model was identified as the model that best represented the suspension dynamics.

Keywords: Suspension system, Dynamic model, System identification, MATLAB, Simulink

Fakat, büyük salınımlar olduğunda dengenin ve konforun kaybedilmesine neden olmaktadır. 1970'lerden bu yana, pasif süspansiyonun olumsuz yönlerini gidermek için yarı aktif ve aktif süspansiyon sistemleri otomotiv endüstrisi için geliştirilmektedir [5-9]. Ancak, aktif ve yarı aktif süspansiyon sistemi maliyet açısından hala uygun değildir [10]. Süspansiyon sistemlerinden, değişken sönümleme elemanı karakteristiğine sahip sistemlere, yarı aktif süspansiyon sistemleri denir [11]. Bu süspansiyon sisteminde, geleneksel doğrusal amortisörler yerine elektromanyetik amortisörler kullanır. Amortisöre sağlanan akım, çevresindeki metal parçacıkların düzenini değiştirebilir, bu da içindeki sıvının viskozitesini değiştirmektedir [11]. Yarı aktif süspansiyon sistemi, diğer süspansiyon sistemlerine göre daha basit bir yapıya sahiptir ve bu nedenle maliyeti düşüktür [12]. Fakat salımların kontrol verimliliği düşüktür [13]. Bir diğer süspansiyon sistemi de

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muratcatalakaya@ksu.edu.tr (M. Çatalakaya)
Geliş / Recieved: 05.09.2024 Kabul / Accepted: 06.11.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1544291

aktif süspansiyon sistemidir. Aktif süspansiyon sistemi, yarı aktif süspansiyon sistemine göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sistem ek bir hidrolik aktüatöre sahiptir. Hidrolik aktüatör, araç gövdesine kuvvet uyguladığından araç salınımını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Yukarıda bahsi geçen tüm süspansiyon sistemlerinin performansını artırmak amacıyla hem tasarım aşamasında hem de tasarım sonrasında çeşitli kontrol yöntemleri uygulanmak için matematiksel modellerinin çıkarılması gerekmektedir. Süspansiyon sistemlerine ait matematiksel modellerin elde edilebilmesi için genellikle çeyrek taşıt olarak bilinen, asılı kütle ve lastik dinamiklerini içeren iki serbestlik dereceli bir model kullanılmaktadır. Çeyrek araç modeli; tüm aracın bir teker üzerine düşen asılı kütle (sprung mass) ve aks-teker grubunun yarısını temsil eden yaysız kütle (unsprung mass) ile oluşturulan iki serbestlik dereceli model olarak bilinmektedir [14]. Bir sistemin matematiksel modelini elde etmek için, Newton'un hareket yasaları gibi fizik kanunlarının yanı sıra deneysel verilerden de yararlanılmaktadır. Bilindiği üzere, bir sisteme uygulanan kontrol yönteminin başarısı, sistemin matematiksel modelinin ve çalışma parametrelerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Günümüzde; deneysel veriler kullanılarak, sistemlerin modellenmesine yönelik çalışmalar sürekli olarak artmaktadır. Bu çalışmalarda, yapay zekâ algoritmaları ve sayısal analiz uygulamaları gibi yöntemler kullanılmaktadır [15]. Bahsi geçen bu yöntemler kullanılarak, sistemi tanımlayan dinamik sistem modelleri türetilmekte, bu modellere ilişkin parametreler ve sistem kontrolü için gerekli matematiksel modeller elde edilebilmektedir. Bir sistemin matematiksel modelinde, geleneksel veya gelişmiş kontrol teknikleri kullanılarak kontrol edilip edilmediğine bakılmaksızın kabul edilebilir doğrulukta çalışması beklenir [16]. Matematiksel model geliştirmek için kullanılan üç farklı yöntem vardır. Birinci yöntem beyaz kutu (white-box) diye adlandırılan yöntem olup bu yöntem için temel gereksinim sistemi tam tanımlayan, sisteme ait matematiksel denklemleri ve sistem değişkenlerinin bilinmesidir. İkinci yöntem ise gri kutu (grey-box) yöntemidir ve sistemin sadece matematiksel denklemleri bilinmekte olup sistem değişkenleri belirsizdir. Üçüncü yöntem ise kara kutu (black-box) yöntemidir. Bu yöntemde sisteme ait herhangi bir matematiksel ve sistem parametreleri bilgisi yoktur. Günlük hayatta kullanılan sistemlerin çoğu karmaşıktır, doğrusal değildir ve önemli bir zaman gecikmesine sahip kara kutu şeklinde ki sistemlerdir [17]. Bu bağlamda, gerçek bir sistemin açık çevrim veya kapalı çevrim deneysel verileri kullanılarak bir sistemin bilinmeyen matematiksel modeli ve sistem parametreleri elde edilmektedir [18-20]. Deneysel verileri kullanarak belirli bir sistemin matematiksel modelini geliştirme tekniğine sistem tanımlama (system identification-SI) denir [21-27]. SI birçok otonom sistemler ve robotik alanlarda önemli sorunları çözmeye uzun bir geçmişe sahiptir. Örneğin; robotik manipülatörlerin kinematik modelinin elde edilmesi, kalibrasyonu, parametrelerinin belirlenmesi, kontrol ve sinir ağı tabanlı sistemlerin kontrol parametrelerinin tanımlanması, atalet parametrelerinin tahmini gibi çok sayıda örnekler verilebilir [28]. SI ile ilgili

çalışmalar özetlenecek olursa; Eng [29], deneysel olarak tasarlanan, otonom bir sualtı aracına ait sistem dinamiği modelini tanımlamıştır. Garg [30], kara kutu, gri kutu, beyaz kutu ve parametrik, parametrik olmayan SI yöntemlerini kullanan çeşitli modelleme yöntemlerini ve model türlerini ele almıştır. Lai [31] küçük bir insansız helikopter için yunuslama, yalpalama ve dönme dinamik modellerini tanımlamak için bir SI modeli geliştirmiş, ardından tahmin edilen model için bir döngü içi yazılım türetmiştir. Hasiewicz [32], blok yönelimli dinamik doğrusal olmayan sistemler için bir SI modeli geliştirmiştir. Antonelli [33], bulanık mantık denetleyicisine dayalı bir SI algoritması öne sürmüştür. Bu çalışmada, bir aracı güvenli bir şekilde sürmek için ilerideki istenen yolun eğriliği ile bir sonraki viraj arasındaki mesafe bilgilerini kullanmıştır. Gupta ve ark. [16], tek giriş-tek çıkışlı (SISO) bir sistem olan ısı eşanjörünün matematiksel modelini SI yöntemlerini kullanarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri modelleri FPE, MSE, FIT doğrulama kriterleri kullanarak irdelemişler ve OE modelinin sistem dinamiklerini veren en iyi model olarak tanımlamışlardır. Aruna ve ark. [34], bir SISO sistemi olan hibrit depolama yatağının matematiksel modelini SI tanımlama yöntemleri kullanarak ortaya koymuşlardır. Çalışma sonucunda modelleri FPE, FIT doğrulama kriteri kullanarak BJ modelini en iyi model olarak seçmişlerdir.

Yapılan bu çalışmada, ilk olarak çeyrek araç süspansiyon sisteminin simülasyon modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu simülasyon modeline çeşitli yol girdileri uygulayarak süspansiyon sistemine ait veri setleri oluşturulmuştur. Bu veri setleri kullanılarak sisteme ait transfer fonksiyon modelleri ARX, ARMAX, BJ ve OE metotları ile elde edilmiştir. Bu modellerin sistem dinamiğine uyup uymadığı çeşitli doğrulama yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Uyum sağlayan modeller daha sonra farklı yol senaryoları ile test edilmiş ve simülasyon sonuçlarına en yakın transfer fonksiyon modeli, sistemi tanımlayan model olarak seçilmiştir. Ayrıca seçilen modellerin performansı literatürdeki çalışmalarla kıyaslanmıştır.

2 Materyal ve metot

Yapılan bu çalışmada çeyrek araç süspansiyon sisteminin matematiksel modelin blok diyagramı Matlab simulink ortamında oluşturulmuştur. Elde edilen modele birim basamak yol girdisi verilerek sistemde zaman serisi şeklinde veri seti elde edilmiştir. Daha sonra bu modele SI yöntemleri uygulanarak sistemin dinamiklerini veren transfer fonksiyon modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller çeşitli doğrulama kriterinden geçirilmiş ve sistemi en iyi temsil eden model seçilmiştir. Son olarak ise sistemi temsil eden modellerin performansları sinüs ve tümsek yol girdi profilleri ile modellerin doğruluğu farklı senaryolar altında test edilmiştir.

2.1 Çeyrek araç modelinin matematiksel modeli

Kontrol alanında, sistemlerin modellenmesi çok önemli bir bileşendir. Bilim insanları ve mühendisler, gerçek tasarım üretimine odaklanmadan önce sistemin hareket matematiksel denklemini oluştururlar. Matematiksel modelleme, mevcut modelin veya yapılacak modelin matematiksel dilde tasvir edilmesi ve tanımlanması amacıyla geliştirilir. Ayrıca geliştirilen matematiksel modeller

sayesinde sistemlere ait simülasyonlar yapılabilmekte ve bu simülasyonlar sayesinde, üretim aşamasına geçmeden, sistem davranışları incelenmektedir. Bu çalışmada iki serbestlik dereceli çeyrek araç gövdesi için süspansiyon sisteminin matematiksel modellemesi temel mekanik yasalar kullanılarak yapılmıştır (Şekil 1). Süspansiyon sisteminin modellemesinde aşağıdaki sınır ve başlangıç kabulleri dikkate alınmıştır:

- Süspansiyon sistemi, iki serbestlik dereceli bir sistem olarak kabul edilmiştir ve çeyrek araç için doğrusal veya yaklaşık olarak doğrusal bir sistem olarak varsayılmıştır.

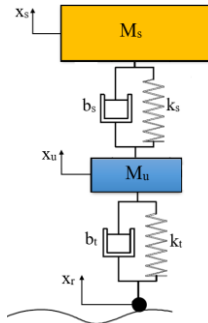
- Sistemin karmaşıklığını azaltmak için düşük etkili kuvvetler göz ardı edilmiştir. Bu kuvvetler sistem modelinde dikkate alınmamıştır.

- Lastik malzemesi hem sönümleme hem de sertlik özelliklerine sahip olarak kabul edilir.

- Aşağıda gösterilen çeyrek araç modeli, her bir tekerlek için araç sistemini temsil etmektedir.

- Bu modelde, süspansiyon sistemine ait yay k_s ve bir sönümleyici b_s ile gösterilmiştir. Lastik sertliği ve sönümleme özellikleri de sırasıyla k_t ve b_t ile gösterilmiştir. Etkili araç gövde kütlesi M_s (yayı kütlesi) ve tekerlek ile aks için etkili kütle M_u (yaysız kütle) olarak gösterilmiştir.

- M_u ve M_s 'nin statik dengeden dikey yer değiştirmeleri sırasıyla x_u ve x_s ile gösterilmiştir. Yol profili x_r ile temsil edilmiştir. Süspansiyon hareketi $x_s - x_u$ olarak belirlenmiştir ve referans noktasıyla ($x_r = 0$) karşılaştırılacaktır.



Şekil 1. Süspansiyon sistemi için çeyrek araç modeli

Yukarıda yapılan sınır ve başlangıç kabulleri altında araç süspansiyon sistemine ait iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt

modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Çeyrek taşıt modelinin Newton'un hareket kanunları uygulandığında elde edilen hareket denklemleri aşağıda verilmiştir.

M_u kütlesi için;

$$b_s(\dot{x}_u - \dot{x}_s) + k_s(x_u - x_s) + b_t(\dot{x}_u - \dot{x}_r) + k_t(x_u - x_r) = -M_u\ddot{x}_u \quad (1)$$

M_s kütlesi için;

$$b_s(\dot{x}_u - \dot{x}_s) + k_s(x_u - x_s) = M_s\ddot{x}_s \quad (2)$$

olarak elde edilmiştir.

Tablo 1'de ise çeyrek taşıt modeline ait fiziksel parametreler ve değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Sistem parametreleri [1]

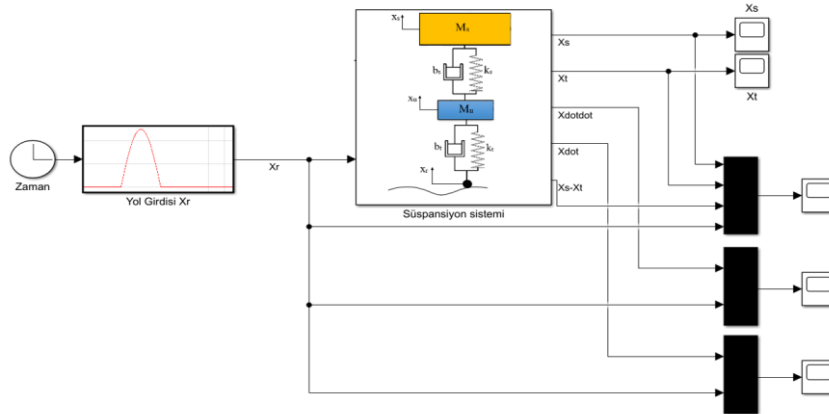
Sembol	Değer	Birim
M_s	241.5	kg
M_u	41.5	kg
b_s	300	Ns/m
k_s	6000	N/m
b_t	1500	Ns/m
k_t	14000	N/m

2.2 Blok diyagramı

Matlab programı içerisinde çalışan simulink modül; matematiksel ifadeler yerine matematiksel blok operatörlerinin kullanıldığı bir arayüzdür. Simulink kütüphanesinde mekanik, elektrik, hidrolik, manyetik gibi çeşitli çalışma alanlarına yönelik hazır bloklar bulunmaktadır. Bu blokların bağıntıları kolayca oluşturulmaktadır. Çalışmada, çeyrek araç modelinin süspansiyon sistemi simulink modülü kullanılarak modellenmiştir.

Simulink modülünde matematiksel bloklar kullanıldığı için modelleme çalışması gayet kolaydır. Sistemin hareket denklemleri, bu bloklar kullanılarak modelleme çalışması yapılmıştır. Bu modelleme sayesinde, sistemi anlama, tasarlama, değiştirme ve farklı senaryolar altında dinamiklerini gözlemlemek bakımından büyük kolaylıklar sağlanmaktadır.

Şekil 1'de serbest cisim diyagramı verilen çeyrek araç süspansiyon sisteminin Simulink de tasarlanan blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.



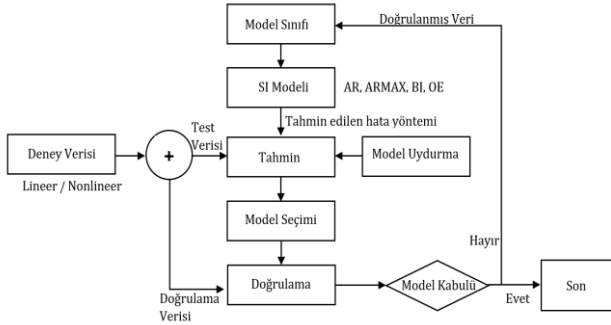
Şekil 2. Süspansiyon sistemine ait çeyrek araç simulink modeli

2.3 Sistem tanımlama (system identification)

SI, gözlemlenen giriş-çıkış verilerine dayalı olarak dinamik sistemlerin doğrusal veya doğrusal olmayan matematiksel modellerini geliştirmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [35]. SI sıfırlar, kutuplar ve gecikme gibi elemanlardan oluşan bir transfer fonksiyonu kullanarak, bilinmeyen sabit değerleri matematiksel bir yöntemle değerlendirir ve tahmin eder. Bir sistemi SI olarak ele alabilmek için uygun bir SI modeli seçilir. Bu modelin oluşturulmasını sağlayan katsayılar ve sabitler deneysel veriler doğrultusunda tahmin edilir. Tahmin işlemi tamamlandıktan sonra, modelin deneysel verilere uygun olup olmadığı çeşitli test ve doğrulama süreçleri ile kontrol edilir [16]. Eğer test sonuçları istenen hata aralığında değilse, yeni bir SI modeli seçilir ve süreç tekrar edilir (Şekil 3).

SI'daki en önemli hususlardan biri, kapalı çevrim veya açık çevrim bir sistemden test verisi elde etmektir [36, 37]. SI'dan elde edilecek transfer fonksiyonunun kalitesi, deneylerin optimum sayısına ve verilerin tutarlılığına bağlıdır.

Geleneksel olarak, SI modelleri ARX modelleme, OE modelleme, ARMAX modelleme ve Box-Jenkins modelleme yöntemlerinden oluşmaktadır [38].



Şekil 3. Sistem tanımlama prosedürü

2.3.1 SI model yapıları

Doğrusal zamanla değişmeyen (LTI) bir sistemin transfer fonksiyonu modelinin genel tanımı aşağıdaki gibi bir matematiksel denklemle ifade edilir:

$$y(k) = G(q, \theta) u(k) + H(q, \theta) \varepsilon(k) \quad (3)$$

Denklem (3), Denklem (4) ve (5) ile daha ayrıntılı olarak ifade edilebilir.

$$G(q, \theta) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k} = \frac{B(q)}{A(q)F(q)} \quad (4)$$

$$H(q, \theta) = \sum_{k=1}^{\infty} h(k)q^{-k} = \frac{C(q)}{A(q)D(q)} \quad (5)$$

Denklem (3)-(5), $G(q, \theta)$ sistem modelini, $H(q, \theta)$ gürültü modelini, $u(k)$ sisteme verilen girdi, $y(k)$ ise verilen

girdiye karşın alınan çıktı sinyalinin, $\varepsilon(k)$ sistem hareket gürültüsünü (acting noise), q^{-k} callback operatörünü ve Θ sistem vektörünü temsil etmektedir.

Denklem (3)'teki transfer fonksiyonu modeline Denklem (4) ve (5) uygulandığında genel olarak aşağıda verilen Denklem (6)'daki gibi ifade edilebilir.

$$y(k) A(q) = \frac{B(q)}{F(q)} y(k) + \frac{C(q)}{D(q)} \varepsilon(k) \quad (6)$$

Denklem (7)'de verilen, $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$ ve $F(q)$ deney verileri temsil eden polinomlar olup burada, n_a , n_b , n_c , n_d , n_f ve n_k polinom dereceleridir. Bu polinomlar aşağıda verilen denklemler ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \\ B(q) &= b_1 q^{-1} + \dots + a_{n_b} q^{-n_b} \\ C(q) &= 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \\ D(q) &= 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{n_d} q^{-n_d} \\ F(q) &= 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{n_f} q^{-n_f} \end{aligned} \quad (7)$$

Denklem (6) aynı zamanda, farklı parametrik modeller ile de (ARX, ARMAX, BJ, OE) ifade edilebilir.

$$y(k)_{ARX} = \frac{B(q)}{A(q)} q^{-n_k}(k) + \frac{1}{A(q)} \varepsilon(k) \quad (8)$$

$$y(k)_{ARMAX} = \frac{B(q)}{A(q)} q^{-n_k}(k) + \frac{C(q)}{A(q)} \varepsilon(k) \quad (9)$$

$$y(k)_{BJ} = \frac{B(q)}{F(q)} q^{-n_k}(k) + \frac{C(q)}{D(q)} \varepsilon(k) \quad (10)$$

$$y(k)_{OE} = \frac{B(q)}{F(q)} q^{-n_k}(k) + \varepsilon(k) \quad (11)$$

Yukarıda matematiksel yapıları verilen tüm model türleri, gerçek sistemin parametreleri hakkında hiçbir bilgi olmadan, oldukça etkili ve dinamik sistemlerin çoğunu modelleyebilmektedir [39]. Bahsi geçen modeller içinde ARX modeli, sistem girdisi (giriş sinyali) içeren en basit modeldir. ARX modeli için tahmin, polinom tahmin yöntemleri arasında en verimli olanıdır; çünkü analitik forma dayalı doğrusal regresyon denklemlerinin çözülmesinin sonucudur. Fakat ARX modelinin dezavantajı, bozucu etkilerinin sistem dinamiğinin bir parçası olmasıdır. ARX modelinden farklı olarak ARMAX modelinin sistem yapısı bozulmaları da içermesidir [39]. ARMAX modelleri, baskın bozucuların daha erken devreye girmesi durumunda kullanışlıdır. Box-Jenkins modeli bir sistemin tam bir modelini sağlamaktadır. Bu model bozucu etkileri sistemin dinamiğinden ayrı tutar ve bozulmalar geç girdiği sistemlerde faydalıdır. OE modelinde ise yalnızca tüm sistem dinamiği dikkate alınır. Bozucu etkiler kısmı modellenmemiştir [39].

2.3.2 SI model doğrulama

SI ile elde edilen sistemin transfer fonksiyonunun deneysel verilere uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla çeşitli test ve doğrulama işlemleri yapılmaktadır. Tahmin edilen modelin geçerliliğini değerlendirmek için kullanılan Akaike'nin Nihai Tahmin Hatası (Final Prediction Error-FPE) ve Akaike'nin Bilgi Kriterleri gibi farklı model doğrulama kriterleri vardır [16]. FPE aşağıda verilen Denklem (12) ile hesaplanmaktadır.

$$FPE = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e(k, \theta) (e(k, \theta))^T \right| \left(\frac{1 + (d_m/n)}{1 - (d_m/n)} \right) \quad (12)$$

Bu denklemde d_m tahmin edilen parametrelerin sayısı, N deneysel sistemden gelen veri miktarı, $e(k)$ tahmin edilen hata vektörü ve θ tahmin edilen parametrelerdir. Tahmin modelinin kalitesini değerlendirmek için ise FIT olarak adlandırılan doğrulama kriteri kullanılır. FIT değerleri ne kadar yüksek olursa, tahmin sonuçları o kadar doğru olur [16]. FIT aşağıda verilen Denklem (13) ile hesaplanmaktadır;

$$FIT = 100 \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y(k) - \bar{y}(k))^2}} \right) \quad (13)$$

Bu denklemde $y(k)$ sistemden ölçülen test çıktısı, $\hat{y}(k)$ tahmin edilen modelin yanıtı ve \bar{y} ölçülen verilerin ortalama değeridir.

Model performans değerini ifade etmek için ise "Ortalama Hata Karesi (Mean Square Error-MSE)" doğrulama değeri ile bulunur. Bu değer ortalamadan sapmaların karelerinin toplanması ve bu değerinin ortalamasının alınması ile hesaplanmaktadır. MSE Denklem (14) ile ifade edilmektedir. Denklemde "n" veri sayısını; $e(t)$ ise gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki hata değerini ifade etmektedir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e(t) \quad (14)$$

Bütün bu doğrulama kriterlerine ek olarak; hangi modelin uyumunun zayıf olduğunu tespit etmek için IAE (Integral of the Absolute Value of Error) doğrulama kriteri kullanılmaktadır. Bu kriter, deney sonuçları ve model çıktıları arasındaki hatanın mutlak değerinin integrali ile elde edilmektedir [40]. IAE olması gereken sinyal değeri ile gerçek sistem değeri arasındaki sapmanın (e) mutlak değerlerinin bütünü temsil eder. Kare hata tabanlı metrik davranıştan farklı olarak, IAE hatanın büyüklüğünü göz önünde bulundurarak karelenmesine izin vermez. Bu hata, Denklem (15)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (15)$$

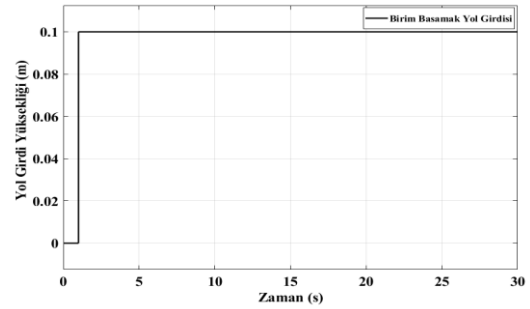
Sistemin dinamik davranışlarını en iyi şekilde veren matematiksel modeli elde etmek amacıyla oluşturulan modeller; modelin geçerliliği, performansı ve kalitesi için FPE, FIT, MSE doğrulama kriterlerinden geçirilmiştir. Oluşturulan modelin farklı girdiler ile arasındaki hata miktarına bakmak için ise IAE doğrulama kriteri kullanılmıştır.

2.4 Yol profil girdileri

Simulink ortamında tasarlanan süspansiyon sistemine ait blok diyagramına üç farklı yol girdisi iki amaç için uygulanmıştır.

2.4.1 Birim basamak yol girdisi

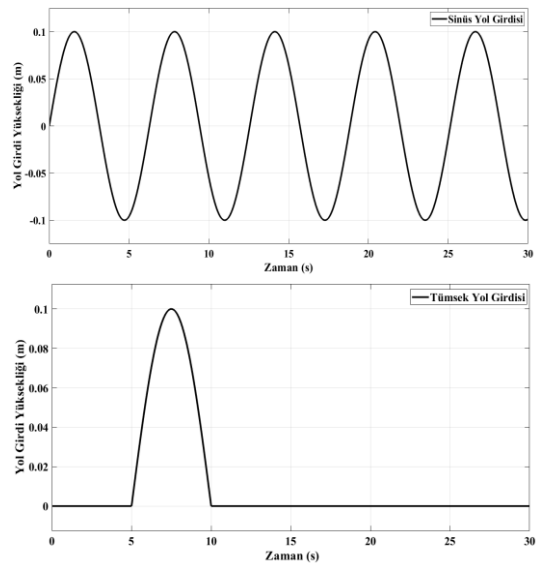
Bu yol girdi senaryosunda; sistemin dinamiklerini elde edebilmek, sistemi tanımlayan transfer fonksiyonlarını oluşturabilmek için gerekli olan veri setlerini elde etmek amacıyla blok diyagramına büyüklüğü 0.1m olan birim basamak fonksiyonu yol girdisi olarak verilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Birim basamak yol girdi profili

2.4.2 Sinüs ve tümsek yol girdi profilleri

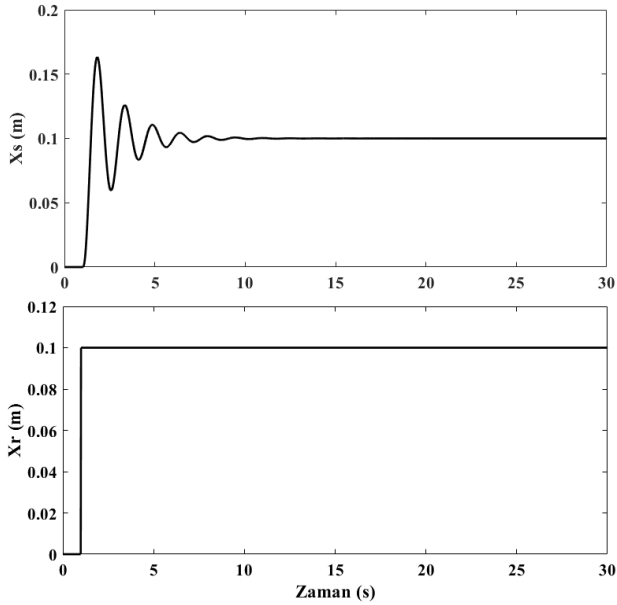
Bu senaryoda ise SI yöntemleri kullanılarak oluşturulan sistemin transfer fonksiyonlarının farklı senaryolar altındaki performansını değerlendirmek için blok diyagramına sinüs ve tümsek yol girdi fonksiyonları sistem girdisi olarak verilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Sinüs ve tümsek yol girdi profili

3 Bulgular ve tartışma

Çeyrek araç süspansiyon sistemine ait blok diyagramına; SI yapılarak, sistemin matematiksel modelini oluşturmak ve gerekli verileri toplamak üzere; birim basamak yol girdisi, test sinyali olarak uygulanmış, simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan simülasyonda, SI için gerekli olan, x_r yol girdi sinyali (u_1), araç gövdesi yer değiştirme miktarı x_s çıktı sinyali (y_1) olarak belirlenmiştir. Simülasyonda birim basamak genliği 0.1m olarak alınmış olur simülasyon süresi 30 s olarak belirlenmiştir. Süre boyunca, zamana bağlı araç gövde yer değiştirmesi için 30023 veri seti elde edilmiş ve veri örnekleme periyodu 0.01 s olarak belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. SI için elde edilen veri seti

SI için sisteme uygulanana birim basamak yol girdisi ile araç gövde yer değiştirme miktarı x_s girdi sinyalinin büyüklüğü etrafında salınım yapmıştır. Bunun nedeni ise girdi sinyalinin simülasyon sonlanıncaya kadar sabit bir büyüklük ile sistemi uyarmasıdır [41-42]. Uygulama sonucunda Blok diyagramından veriler alındıktan sonra, eksik verilerin tamamlanması, tekrar eden verileri silinmesi, düzenlenmesi, ayıklanması, boyut indirgenmesi gibi veri ön işleme yapılmıştır. Daha sonra hazırlanan veriler Matlab programının "system identification" araç menüsüne aktarılarak transferi fonksiyon modelleri elde edilmiştir. Modeller; FPE, FIT ve MSE doğrulama kriterlerine göre test edilerek seçilmiştir. Doğrulanmış modeller, çapraz doğrulama ve otomatik çapraz doğrulama prosedür kullanılarak da kontrol edilmiştir [43].

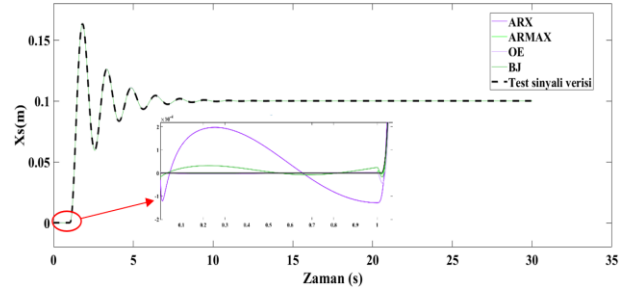
Tablo 2'de, elde edilen en iyi sonuçlara sahip transfer fonksiyon modelleri için FPE, MSE, FIT kriterleri değerleri verilmiştir.

En iyi doğrulama kriterine sahip transfer fonksiyon modellerinin, deney verisine olan yakınsaması Şekil 7'de verilmiştir. ARX modeli ile elde edilen en iyi uygunluk %99.68, ARMAX modeline göre %99.91, OE modeline göre

%99.93 ve BJ modeline göre ise %99.92 olarak elde edilmiştir.

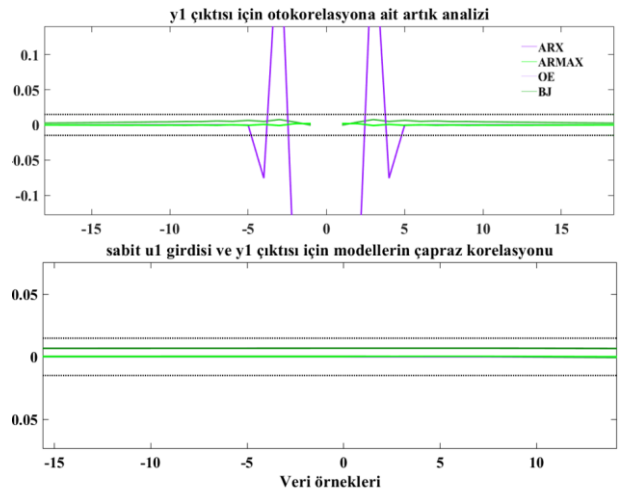
Tablo 2. Seçilen modeller için doğrulama sonuçları

Model	n_a	n_b	n_c	n_d	n_f	n_k	FPE	MSE	FIT%
ARX	4	1	0	0	0	0	1.816e-12	4.916e-9	99.68
ARMAX	3	3	3	0	0	0	2.552e-13	2.55e-13	99.91
OE	0	2	0	0	3	1	2.66e-10	2.66e-10	99.93
BJ	0	2	2	3	3	0	2.565e-13	2.563e-13	99.92



Şekil 7. Deney ve SI modelleri çıktıları

Hata değerlerinin önceki ve sonraki değerleriyle olan ilişkisi otokorelasyon yöntemiyle belirlenmektedir. Sistemin girdi sinyaliyle olan ilişkisi ise çapraz korelasyon (cross-correlation) yöntemiyle kontrolü sağlanmaktadır. Bu yaklaşımlara artık (residual) analizi ismi verilmektedir. Bu yaklaşımla eğer kabul edilebilir veriler edilirse, sistemin girdisi ve çıktısı arasındaki bağıntı, belirlenen transfer fonksiyonu ile temsil edilebilir [44]. Buna göre tüm modellere uygulanan artık analizi Şekil 8'de gösterilmiştir.



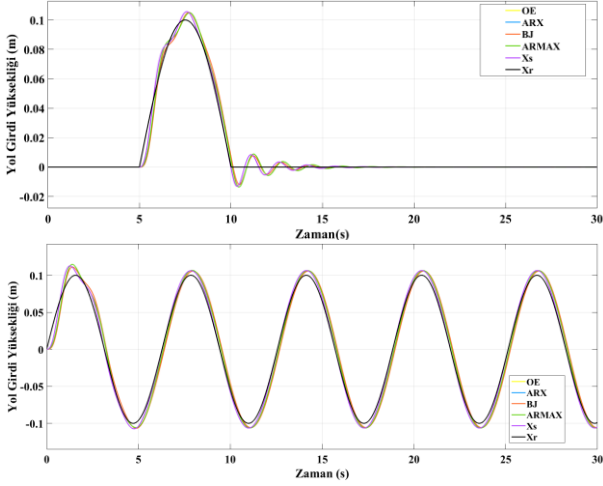
Şekil 8. Modellerin artık (residual) analiz çıktıları

Elde edilen BJ, OE, ARX ve ARMAX modelleri için her iki korelasyon yaklaşımında da güven aralıklarının %99'unda yer aldığından belirlenen modellerin başarılı olduğu net olarak görülmektedir. ARX modelinde otokorelasyon fonksiyonunun anlık değerinde sıfırınca örneklemde güven aralığının dışında olması, korelasyon testinin başarılı olmadığı anlamına gelmemektedir [45]. Korelasyon sonuçlarına göre; her ne kadar anlık olarak örneklemde güven aralığının dışında olan ARX dahil BJ, ARMAX ve OE modellerinin sistem dinamiklerini

yakaladığı nettir. Doğrulama ilkeleri ve korelasyon sonuçlarına bakıldığında doğrusal modeller arasında ARMAX, BJ ve OE modellerinin sistemi optimum seviyede temsil ettiği tecrübe dilmektedir.

3.1 Model seçimi

Belirlenen transfer fonksiyonu modellerinin, sinüs ve tümsek yol girdi fonksiyonları uygulandığından, yol girdilerine gösterdikleri tepkiler ve performansları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Sinüs ve tümsek yol girdileri için transfer fonksiyonları model çıktıları

Modellerin, deney sonuçları ile arasındaki hata miktarlarını belirlemek için IAE hata testi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Modellerin IAE sonuçları

Model	Sinüs yol girdisi	Tümsek yol girdisi
OE	0.2416	0.03312
BJ	0.242	0.03313
ARX	0.2414	0.03307
ARMAX	0.151	0.02981

Analiz neticesinde tüm yol senaryoları için ARMAX modelinin IAE değeri sınıflandırmasına göre sistem dinamiklerini ifade eden "optimum model" olduğu açıkça görülmektedir. ARX, BJ ve OE modellerinin tümsek yol senaryolarına verdiği tepkiler ARMAX ile benzer olsa da sürekli değişen yol senaryosuna gösterdikleri hata tepkisi fazladır. Gerçekleşen doğrulama analizleri sonucunda ARMAX modelinin sistem dinamiklerine en uygun transfer fonksiyonu modeli olduğu değerlendirilmektedir. Literatürde farklı sistemler için belirlenen transfer fonksiyonu modellerinin doğrulama sonuçlarını irdelemek için yapılan benzer çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

Tablo 4'de verilen sonuçlara göre; Gupta ve ark. 1s1 eşanjörü üzerinde yaptıkları çalışma için sistemin dinamiklerini veren model olarak OE modelini FPE = 0.00693, MSE = 0.0069 ve FIT = %72.23 doğrulama değerleri ile en iyi model olarak tanımlamıştır.

Tablo 4. Modellerin doğrulama sonuçları [16]

Model	FPE	MSE	FIT%
ARX	6.902e-5	6.884e-5	36.83
ARMAX	6.926e-5	6.88e-5	37.01
OE	0.00693	0.0069	72.23
BJ	6.912e-5	6.873e-5	40.32

Tablo 5'de, Aruna ve ark. hibrit depolama yatağını modelleme için yaptıkları çalışmada; BJ modelini, FPE ve FIT değerlerini sırasıyla %9.731e-9 ve %80.77 değerleri altında en iyi model olarak seçmiştir.

Tablo 5. Modellerin doğrulama sonuçları [34]

Model	FPE	FIT%
ARX	1.930e-8	68.4
ARMAX	2.061e-8	61.73
OE	1.11725	24.54
BJ	9.731e-9	80.77

4 Sonuçlar

Bu çalışmada; çeyrek araç süspansiyon sistemine ait sistemin dinamiklerini veren transfer fonksiyonu modeli geliştirilmiş ve simüle edilmiştir. Yapılan bu çalışma ile pasif süspansiyon sistemlerine uygulanacak kontrol sistemleri için SI yöntemleri kullanılarak sistemin matematiksel transferi fonksiyonu elde edilerek, kontrolör tasarımı için zemin hazırlanmıştır. Çalışmada süspansiyon sisteminin blok diyagramı Matlab ortamında oluşturulmuş ve bu blok diyagramına genliği 0.1m olan birim basamak yol girdisi uygulanmıştır. Uygulama neticesinden blok diyagramından 32000 sayısal veri alınmış ve bu verilen SI uygulanarak sistemin dinamik davranışlarını veren BJ, OE ARX ve ARMAX modelleri kullanılarak transfer fonksiyonları oluşturulmuştur.

Yapılan analizler neticesinde ARMAX modelinin sistem dinamiklerine en uygun transfer fonksiyonu modeli olduğu sonucuna varılmıştır. ARMAX modeli için uygunluk yüzdesinin değeri %99.91, FPE değeri 2.552e-13 ve MSE değer ise 2.55e-13 olarak elde edilmiştir. SI ile elde edilen modellerin farklı senaryolardaki davranışını belirlemek için sisteme sinüs ve tümsek olmak üzere iki farklı yol girdisi uygulanmış ve modellerin performansları incelenmiştir. Yapılan uygulama neticesinde ARMAX modeli diğer modeller ile karşılaştırıldığında %37.45'lik daha doğru bir şekilde sistem davranışlarını temsil etmiştir. Her ne kadar BJ, OE, ARX modellerinin FIT yüzdesi %99'lük oranlara sahip olsa da, hem korelasyon analizinde hem de IAE analizinde ARMAX modelinin daha başarılı bir model olduğu açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak çeyrek araç modeli üzerinde yapılan SI çalışmaları neticesinde sisteme uyum sağlayan ve sistemi tanımlayan en iyi model olarak ARMAX modeli seçilmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda; çeyrek araç süspansiyon sistemi için SI kullanılarak matematiksel bir transfer fonksiyonu modeli tanımlanmıştır. Ayrıca bu çalışma ile süspansiyon tasarımı için alternatif bir simülasyon yöntemi öne sürülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] D. N. Nguyen and T. A. Nguyen, The dynamic model and control algorithm for the active suspension system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2023(1), 1-9, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/2889435>.
- [2] U. Kırbaş and M. Karasahin, Karayolu-demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan titreşimin insan sağlığını etkileme seviyeleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 487-500, 2023. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1214112>.
- [3] T. E. Putra, N. Husaini, and M. Iqbal, Automotive suspension component behaviors driven on flat and rough road surfaces. *Heliyon*, 7(7), 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07528>.
- [4] T. A. Nguyen, Advance the stability of the vehicle by using the pneumatic suspension system integrated with the hydraulic actuator. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18(7), 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1590/1679-78256621>.
- [5] C. Poussot-Vassal, O. Sename, L. Dugard, P. Gáspár, Z. Szabó, and J. Bokor, A new semi-active suspension control strategy through LPV technique. *Control Engineering Practice*, 16(12), 1519–1534, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.05.002>.
- [6] D. Hrovat, D. L. Margolis, and M. Hubbard, An approach toward the optimal Semi-Active suspension, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 110(3), 288–296, 1988. <https://doi.org/10.1115/1.3152684>.
- [7] M. Z. Q. Chen, Y. Hu, C. Li, and G. Chen, Semi-active suspension with semi-active inerter and semi-active damper. *IFAC Proceedings*, 47(3), 11225–11230, 2014. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00138>.
- [8] M. Canale, M. Milanese, and C. Novara, Semi-active suspension control using ‘fast’ model-predictive techniques. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(6), 1034–1046, 2006. <https://doi.org/10.1109/TCST.2006.880196>.
- [9] A. Fien, Active suspension systems for rail vehicles, *Vehicle System Dynamics*. 6(2-3), 206, 1977. <https://doi.org/10.1080/00423117708968542>.
- [10] A. Soliman and M. Kaldas, Semi-active suspension systems from research to mass-market – A review. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40(2), 1005–1023, 2019. <https://doi.org/10.1177/1461348419876392>.
- [11] J. Yang, D. Ning, S.S. Sun, J. Zheng, H. Lu, M. Nakano, S. Zhang, H. Du, W.H. Li, A semi-active suspension using a magnetorheological damper with nonlinear negative-stiffness component. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147(2021), 1-21, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107071>.
- [12] M. Ghoniem, T. Awad, and O. Mokhiamar, Control of a new low-cost semi-active vehicle suspension system using artificial neural networks. *Alexandria Engineering Journal*, 59(5), 4013–4025, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.007>.
- [13] N. A. Saadabad, H. Moradi, and G. Vossoughi, Semi-active control of forced oscillations in power transmission lines via optimum tuneable vibration absorbers: With review on linear dynamic aspects. *International Journal of Mechanical Sciences*, 87, 163–178, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.06.006>.
- [14] H. Okuturlar and M. Tinkir, Araç süspansiyon sisteminin nümerik ve deneysel dinamik analizi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 85–105, 2021. <https://doi.org/10.36306/konjes.778390>.
- [15] M. Daş, E. Alıç, and E. K. Akpınar, Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 24(1), 236–246, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.003>.
- [16] S. Gupta, R. Gupta, and S. Padhee, Parametric system identification and robust controller design for liquid–liquid heat exchanger system. *IET Control Theory and Applications*, 12(10), 1474–1482, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2017.1128>.
- [17] L. Ljung, System identification. In *Signal analysis and Prediction*, Birkhäuser, Boston, MA, 1998.
- [18] A. K. Tangirala, Principles of system identification. Taylor and Francis, Abingdon, 2018.
- [19] P. Shah and R. Sekhar, Closed loop system identification of a dc motor using fractional order model. 2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE), pp. 69-74, Bali, Indonesia, 2019.
- [20] P. Shah, S. Agashe, and V. Vyawahare, System identification with fractional-order models: A comparative study with different model structures. *Progress in Fractional Differentiation and Applications*, 4(4), 533–552, 2019. <http://dx.doi.org/10.18576/pfda/040407>.
- [21] H. Hjalmarsson, From experiment design to closed-loop control. *Automatica*, 41(3), 393–438, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2004.11.021>.
- [22] P. Wolszczak, K. Łygas, and G. Litak, Dynamics identification of a piezoelectric vibrational energy harvester by image analysis with a high speed camera. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 43–52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.01.024>.
- [23] R. Cechowicz and P. Stączek, Computer supervision of the group of compressors connected in parallel. *Eksploracja I Niezawodność-Maintenance and Reliability*, 16(2), 198-202, 2014.
- [24] A. Martynenko, Computer Vision for Real-Time control in drying. *Food Engineering Reviews*, 9(2), 91–111, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9159-5>.
- [25] L., P. Yang, S.-L. Ding, G. Litak, E.-Z. Song, and X.-Z. Ma, Identification and quantification analysis of



- nonlinear dynamics properties of combustion instability in a diesel engine. *Chaos an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 25(1), 013105/1-013105/13, 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4899056>.
- [26] P. Harris, M. Arafa, G. Litak, C. R. Bowen, and J. Iwaniec, Output response identification in a multistable system for piezoelectric energy harvesting. *The European Physical Journal B*, 90(1), 1-11, 2017. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2016-70619-y>.
- [27] G. Litak and R. Rusinek, Identification of turning and milling processes by stochastic langevin equations. 2012 IEEE 4th International Conference on Nonlinear Science and Complexity (NSC), pp. 41-44, Budapest, Hungary, 2012.
- [28] L. Ljung, System identification: An Overview. in *Encyclopedia of Systems and Control*, pp. 2302–2317, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5_100.
- [29] Y. H. Eng, K. M. Teo, M. Chitre and K. M. Ng, Online System Identification of an Autonomous Underwater Vehicle Via In-Field Experiments. in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(1), 5-17, 2016. <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2403576>.
- [30] A. Garg, K. Tai, and B. N. Panda, System identification: Survey on modeling methods and models. in *Advances in intelligent systems and computing*, 607–615, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3174-8_51.
- [31] Y.-C. Lai and Q. Le Tri, System identification and control of a small unmanned helicopter at hover mode, 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Bangkok, Thailand, pp. 92-96, 2017.
- [32] Z. Hasiewicz, P. L. Śliwiński, and G. Mzyk, Nonlinear system identification under various prior knowledge. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 7849–7858, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08954-7>.
- [33] G. Antonelli, S. Chiaverini and G. Fusco, A fuzzy-logic-based approach for mobile robot path tracking, in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(2), 211-221, 2007. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2006.879998>.
- [34] R. Aruna and S. T. J. Christa, Modeling, system identification and design of fuzzy PID controller for discharge dynamics of metal hydride hydrogen storage bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4703–4719, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.238>.
- [35] E. Alvarez-Sánchez, A Quarter-Car suspension system: car body mass estimator and sliding mode control. *Procedia Technology*, 7, 208–214, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.026>.
- [36] T. S. Ng, G. C. Goodwin, and T. Söderström, Optimal experiment design for linear systems with input-output constraints. *Automatica*, 13(6), 571–577, 1977. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(77\)90078-4](https://doi.org/10.1016/0005-1098(77)90078-4).
- [37] A. A. Mahfouz, M. M. K, and F. A. Salem, Modeling, simulation and dynamics analysis issues of electric motor, for mechatronics applications, using different approaches and verification by MATLAB/Simulink. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 5(5), 39–57, 2013. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2013.05.06>.
- [38] L. Ljung, System Identification. in: W. S. Levine. (eds.) *The Control Systems Handbook: Control System Advanced Methods*. Second Edition, pp. 57-1, CRC Press, Heidelberg, 2010.
- [39] A. B. Singh, R. V. Murugan, K. Saravanan, A. S. Ahmed, and R. Vinoth, Fractional order control and comparative analysis of a hybrid system. *Procedia Computer Science*, 48, 37–44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.107>.
- [40] T. Kumbasar, I. Eksin, M. Guzelkaya, and E. Yesil, Adaptive fuzzy model based inverse controller design using BB-BC optimization algorithm. *Expert Systems With Applications*, 38(10), 12356–12364, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.015>.
- [41] S. Kumar, A. Medhavi, R. Kumar, and P.K. Mall, Modeling, analysis and PID controller implementation on suspension system for quarter vehicle model. *J. Mech. Eng. Sci.*, 16(2), 8905–8916, 2022. <https://doi.org/10.15282/jmes.16.2.2022.08.0704>.
- [42] O. Eser, A. Çakan, M. Kalyoncu, and F. Botsali, Arı algoritması (aa) ve parçacık sürü optimizasyonu (pso) kullanarak çeyrek araç modeli tasarım parametrelerinin belirlenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(3), 621–632, 2021. <https://doi.org/10.36306/konjes.881062>.
- [43] K. A. Mohideen, G. Saravanakumar, K. Valarmathi, D. Devaraj, and T. K. Radhakrishnan, Real-coded Genetic Algorithm for system identification and tuning of a modified Model Reference Adaptive Controller for a hybrid tank system. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 3829–3847, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.08.019>.
- [44] C. Lewis, *International and Business Forecasting Methods* Butterworths. London, 1982.
- [45] H. İ. Çardaklı, İnsan-makina etkileşimli bilgisayar deneyi kullanarak insan operatörlerin parametrik ve akıllı sistemlerle modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2005.





Meta sezgisel arama algoritmalarının çok seviyeli görüntü eşikleme performanslarının karşılaştırılması

Comparison of multi-level image thresholding performances of meta-heuristic search algorithms

Asuman Günay Yılmaz^{1,*} , Samoua Alsamoua² 

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapay Zeka ve Veri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Öz

Görüntü segmentasyonu alanında sıklıkla kullanılan eşikleme dayalı segmentasyon yöntemleri, az sayıdaki eşik değerinin belirlenmesinde başarılıdır. Fakat eşik seviye sayısı arttıkça hesaplama karmaşıklığında üstel artış meydana gelmektedir. Bu nedenle problemin çözümünde meta sezgisel arama algoritmaları tercih edilmektedir. Bu çalışmada görüntü segmentasyonu literatüründe en çok kullanılan 11 meta sezgisel algoritmanın (yapay arı kolonisi, guguk kuşu arama, diferansiyel evrim, gri kurt optimizasyonu, harris şahini optimizasyonu, güve-alev optimizasyonu, parçacık sürüsü optimizasyonu, sinüs kosinüs algoritması, simbiyotik organizmalar arama, salp sürü algoritması, balina optimizasyon algoritması) performansı kıyaslanmıştır. $m=2,3,4,5,6,7,8$ seviyeli segmentasyon ile algoritmaların düşük ve orta seviyelerdeki başarımları değerlendirilmiştir. 100 görüntü üzerinde yapılan deney sonuçları Friedman istatistiksel analiz yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar en başarılı ilk iki algoritmanın güve-alev optimizasyonu ve parçacık sürüsü optimizasyonu olduğunu göstermiştir. Geniş bir veri seti üzerinde çeşitli seviyelerde eşikleme ve farklı sonlandırma kriterleri ile yapılan bu çalışmanın sonuçları, görüntü segmentasyonu alanında çalışan araştırmacılara algoritma seçimi konusunda önemli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Çok seviyeli eşikleme, Görüntü segmentasyonu, Meta sezgisel optimizasyon

1 Giriş

Görüntü segmentasyonu, bir görüntünün şekil, renk, parlaklık ve benzeri ortak özelliklere sahip çok sayıda homojen parçalara bölünmesi işlemidir. Görüntünün karmaşıklığını azaltan ve böylece görüntünün analizini kolaylaştıran segmentasyon işlemi, görüntü tabanlı uygulamalara çok önemli bilgiler sağlar. Nesne sınıflandırma, tıbbi görüntüleme, uzaktan hedef algılama, biyometrik tanıma ve benzeri bilgisayarla görme uygulamalarında sıklıkla kullanılan görüntü segmentasyonu, oldukça aktif bir araştırma alanıdır. Görüntü işleme literatüründe özellikle son birkaç on yılda çok sayıda algoritma önerilmiştir. Bu algoritmalar, histogram tabanlı,

Abstract

Thresholding based segmentation methods are successful in determining small number of threshold values. As the computational complexity is high for multilevel thresholding, meta-heuristic search algorithms are used. In this study, the performance of 11 meta-heuristic search algorithms (artificial bee colony, cuckoo search, differential evolution, gray wolf optimization, harris hawk optimization, moth-flame optimization, particle swarm optimization, sine-cosine algorithm, symbiotic organisms search, salp swarm algorithm, whale optimization algorithm) were compared for image segmentation problem. The low and medium level ($m=2,3,4,5,6,7,8$) segmentation performances of algorithms were evaluated. The experimental results on 100 images were analyzed with Friedman statistical analysis method. The obtained results showed that the first two most successful algorithms were moth-flame optimization and particle swarm optimization. The results of this study, conducted on a large dataset with various levels of thresholding and different termination criteria, provide important information on algorithm selection for researchers working in the field of image segmentation.

Keywords: Multi level thresholding, Image segmentation, Meta heuristic optimization

kümeleme tabanlı, kenar tabanlı ve bölge büyütme tabanlı olarak sınıflandırılabilir. Segmentasyon algoritmasının ve seviye sayısının seçimi, üzerinde çalışılan problemin karakteristiğine ve kullanılan görüntülerin yapısına bağlıdır.

Segmentasyonu algoritmaları içerisinde histogram tabanlı yöntem, basitliği ve hesaplama etkinliği nedeniyle yaygın kullanıma sahiptir. Yöntemde görüntü histogramından uygun eşik değerlerini belirlenerek segmentasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu algoritma ile görüntüyü eşiklemenin iki yolu, iki seviyeli eşikleme ve çok seviyeli eşiklemedir. İki seviyeli eşikleme, görüntünün histogramından tek bir eşik değerinin belirlenmesi ve bu eşik değerinden küçük renk seviyelerinin siyah, büyüklerin beyaz

olarak sınıflandırılması ile ikili görüntü üretilmesi işlemidir. Çok seviyeli eşiklemede ise görüntü histogramından $m \geq 2$ adet eşik değeri belirlenerek görüntü $m+1$ bölgeye ayrılır.

Görüntü histogramından optimum eşik değerinin belirlenmesinde çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlardan en çok kullanılanlar Kapur entropisi [1] ve Otsu kriteridir [2]. Kapur entropisi, gri seviyelerin olasılık dağılımını kullanarak segmente sınıfların histogram entropilerini maksimize eden eşik değerlerini belirler. Otsu kriteri ise sınıflar arasındaki varyansı maksimize eden eşik değerlerini seçer. Sezgin ve Sankur eşik değeri belirleme yöntemlerini kıyaslamış ve Kapur entropisinin diğer fonksiyonlardan daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir [3]. Gri seviye görüntü segmentasyonunda tek renk kanalı için eşikleme fonksiyonları kullanılarak eşik değerleri belirlenmektedir. Renkli görüntülerin segmentasyonunda ise eşik değerlerinin belirlenmesi işleminin tüm renk kanalları için (kırmızı, yeşil, mavi) ayrı ayrı yapılması gerekmektedir.

İki seviyeli segmentasyon probleminin çözümünde başarılı ve etkin bir şekilde kullanılan eşikleme yaklaşımları, çok seviyeli segmentasyon problemi söz konusu olduğunda hesaplama karmaşıklığında ve maliyetinde üstel artışa neden olmaktadır [4]. Bu nedenle araştırmacılar son on yıldır hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve segmentasyon başarımlarını artırmak amacıyla çeşitli meta-sezgisel algoritmaların (MSA) kullanımını önermiştir. MSA'lar, bir çözüm uzayında etkin bir arama yapabilmek ve lokal optimum noktadan kurtulabilme yeteneğine sahip bir süreç oluşturmak için yerel iyileştirme prosedürleri ve üst düzey stratejiler arasında bir etkileşim organize eden optimizasyon teknikleridir. Çok sayıda doğadan ilham alan MSA, çok seviyeli görüntü eşikleme probleminin çözümüne uygulanmıştır. Tüm problemleri başarılı şekilde çözebilecek bir algoritma bulunmadığı/bulunamayacağı için, bu alanda halen çok sayıda çalışma yapılmakta, çeşitli algoritmalar geliştirilmektedir.

Literatürdeki meta-sezgisel optimizasyona dayalı çok seviyeli görüntü eşikleme çalışmalarını iki gruba ayırmak mümkündür. Birinci gruptaki çalışmalar mevcut bir MSA'nın problemin çözümüne uygulanması ve genelde yazarlar tarafından seçilen rakip algoritmalarla kıyaslamasını içermektedir [5-15]. İkinci gruptaki çalışmalarda ise mevcut bir MSA'nın modifiye edilmesi ile yeni bir algoritma geliştirilmesi ve böylece görüntü segmentasyonu performansının artırılması hedeflenmiştir [16-24]. Fakat her bir algoritmanın kendine özgü kısıtları vardır. Bu nedenle araştırmacılar, algoritmadaki arama süreci stratejisini değiştirerek yöntemi modifiye etme ya da algoritmaları birlikte kullanarak hibrid yöntemler geliştirme yoluyla performansı artırmaya ve karmaşıklığı azaltmaya çalışmaktadır.

İlk olarak Yin [5] minimum çapraz entropiye dayalı parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritmasını, çok seviyeli eşikleme ile segmentasyon probleminin çözümünde kullanmıştır. Dört gri seviyeli görüntü üzerinde $m=2, 3, 4$ eşik seviyesi için yapılan deneylerde PSO için iterasyon sayısı 200 olarak uygulanmıştır. Horng [6] Kapur entropisine dayalı bal arısı çiftleşme optimizasyonu (HBMO) algoritmasını çok seviyeli görüntü eşikleme problemi için

önermiştir. 5 gri seviye görüntü için $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşik değerlerinin belirlenmesinde iterasyon sayısı 200 seçilmiş, fakat elde edilen sonuçlardan 100 iterasyonun yeterli olduğu görülmüştür. Horng ve Liou [7] bir sonraki çalışmada eşik değerlerini seçmek için minimum çapraz entropiye dayalı ateşböceği algoritmasını (FA) önermiştir. Akay [8] PSO ve yapay arı kolonisi (ABC) yöntemlerinde amaç fonksiyonu olarak Otsu kriterini ve Kapur entropisini kullanmanın, çok seviyeli görüntü eşikleme problemi çözüm performansına etkisini araştırmıştır. Deneyler 12 gri seviyeli doğal görüntü üzerinde $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşikleme için 100 iterasyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bahandari vd. [9] gri seviyeli uydu görüntülerinin çok seviyeli eşikleme ile segmentasyonu probleminde guguk kuşu arama (CS) ve rüzgâr güdümlü optimizasyon (WDO) yöntemlerinin kullanımını önermiştir. Çalışmalarında 12 gri uydu görüntüsü $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşikleme ile segmente edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak Kapur entropisi kullanılmıştır. Pare vd. [10] optimizasyon işleminin süresini kısaltmayı hedefledikleri çalışmalarında, optimum eşik seviyelerinin etkili ve doğru üretilmesi için, çok seviyeli minimum çapraz entropi fonksiyonunun CS algoritması ile minimize edilmesini önermiştir. Çalışmada önerilen yöntemle 3 renkli doğa ve 3 renkli uydu görüntüsü $m=2, 5, 8, 16$ seviyeli eşiklenerek segmente edilmiş, elde edilen sonuçlar ABC, bakteriyel yiyecek arama algoritması (BFA), WDO ve diferansiyel evrim (DE) algoritmaları ile kıyaslanmıştır. Khairuzzaman ve Chaudhury [11] çok seviyeli eşiklemeye dayalı segmentasyon probleminin çözümünde gri kurt optimizasyonu (GWO) yöntemini kullanmıştır. Kapur entropisi, sınıflar arası varyans eşikleme fonksiyonlarının kullanıldığı çalışmada $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşikleme yapılmıştır. Yöntemin başarımları 8 gri görüntü üzerinde, PSO'nun geliştirilmiş versiyonu ve BFO yöntemleriyle kıyaslanmıştır. El Aziz vd. [12] optimal eşik değerlerinin belirlenmesinde balina optimizasyonu algoritması (WOA) ve güve-alev optimizasyonu (MFO) algoritmalarını kullanmıştır. Algoritmalar sınıflar arası varyans fonksiyonu kullanılarak, 100 iterasyonda $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşiklemede test edilmiştir. 8 gri görüntü üzerinde yapılan segmentasyon sonuçları sinüs kosinüs algoritması (SCA), harmoni arama algoritması (HSO), sosyal örümcek optimizasyonu (SSO), algoritmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Küçükkuşu ve Gedikli [13], simbiyotik organizmalar arama (SOS) algoritmasını görüntü eşikleme probleminde uygulamıştır. Sınıflar arası varyans ve Kapur entropisi fonksiyonlarını kullanan yöntem PSO, FA, ABC, genetik algoritma (GA), GWO algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde 8 gri görüntü $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşiklenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Sathya vd. [14] döviz piyasası algoritması (EMA) yöntemini görüntü segmentasyonu probleminin çözümüne uygulamıştır. Segmentasyon işlem hızını artırmayı amaçlayan çalışmada, sınıflar arası varyans, Kapur entropisi ve minimum çapraz entropi amaç fonksiyonları kullanılmış, $m=4, 5, 6, 7$ seviyeli eşikleme gerçekleştirilmiştir. Deneyler 5 renkli standart test görüntüsü üzerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, krill sürü algoritması (KHA), öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) ve CS algoritmaları ile kıyaslanmıştır. Tüm

algoritmalar için iterasyon sayısı 100 seçilmiştir. Houssein vd. [15], eşikleme probleminin çözümünde kara dul optimizasyonu (BWO) algoritmasını kullanmıştır. Çalışmada sınıflar arası varyans ve Kapur entropisi eşikleme fonksiyonları ile 10 gri seviye görüntü üzerinde $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşikleme yapılmıştır. İterasyon sayısı 350 olarak seçilmiş, yöntem GWO, MFO, WOA, SCA, SSO algoritmaları ile kıyaslanmıştır.

Bahandari vd. [16] uydu görüntülerinin daha hızlı ve verimli segmentasyonu için değiştirilmiş ABC algoritmasını önermiştir. Yöntemde $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşikleme için sınıflar arası varyans, Kapur entropisi ve Tsalli entropisi fonksiyonları kullanılmıştır. Yöntem 5 gri uydu görüntüsü üzerinde test edilmiş ve sonuçlar ABC, PSO ve GA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. He ve Huang [17] renkli görüntülerin çok seviyeli eşikleme ile segmentasyonu probleminin daha etkin çözümü için, standart FA yönteminin performansını artırarak değiştirilmiş FA yöntemini önermiştir. Yöntem, Kapur entropisi, sınıflar arası varyans, Tsalli entropisi fonksiyonları ile 10 renkli görüntünün $m=4, 5, 6, 7$ seviyeli eşiklenmesinde kullanılmıştır. Anihta vd. [18] eşiklemeye dayalı görüntü segmentasyonu probleminin çözümü için değiştirilmiş WOA algoritmasını önermiştir. Algoritma 8 renkli görüntü ile 2 uydu görüntüsünün üzerinde $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli eşikleme için test edilmiştir. İterasyon sayısı 150 olarak belirlenmiş ve önerilen yöntemin sonuçları GA, PSO, ABC ve CS algoritmalarıyla kıyaslanmıştır. Rahkar vd. [19] FA ve PSO algoritmalarını kullanarak hibrid bir segmentasyon yöntemi önermiştir. Sınıflar arası varyans ve Kapur entropisi eşikleme fonksiyonları ile 6 gri seviyeli görüntü üzerinde $m=2, 3, 4, 5$ seviyeli segmentasyon gerçekleştirilmiştir. Yöntemin sonuçları PSO, GA, FA ile kıyaslanmıştır. Çalışmada tüm algoritmalar için iterasyon sayısı 200 olarak kullanılmıştır. Abd Elaziz vd. [20], görüntü segmentasyonu problemi için kuantum deniz yirtıcıları algoritmasını geliştirmiştir. Deneysel bulanık entropi eşikleme fonksiyonu kullanılarak 10 gri seviye görüntü üzerinde $m=6, 8, 15, 17, 19, 25$ seviyeli eşikleme için gerçekleştirilmiş ve iterasyon sayısı 200 olarak kullanılmıştır. Rakip algoritmalar ise deniz yirtıcıları algoritması (MPA), WOA, SCA, MFO, GWO, çekirge optimizasyon algoritması (GOA), salp sürü algoritması (SSA) olarak seçilmiştir. Qiao vd. [21] aritmetik optimizasyon algoritmasını (AOA) harris şahini optimizasyonu (HHO) ile kullanan bir segmentasyon yöntemi önermiştir. Yöntemde ilk 50 iterasyon AOA, sonraki 50 iterasyon ise HHO en iyi çözümü aramaktadır. Deneysel 8 görüntü üzerinde $m=2, 3, 4, 5, 15, 16, 32$ seviyeli eşikleme için gerçekleştirilmiştir. Rakip algoritmalar AOA, HHO, WOA, Çekirge optimizasyon algoritması (GOA) olarak seçilmiştir. Gharehchopogh ve İbrikçi [22] görüntü segmentasyonu için, geliştirilmiş bir Afrika akbaları optimizasyon algoritması (AVOA) önermiştir. Üç farklı eşikleme fonksiyonu için deneyler yapılmış 8 uzay görüntüsü $m=5, 7, 9, 11$ seviyeli segmente edilmiştir. Abualigah vd. [23] ise segmentasyon probleminin çözümü için güçlendirilmiş Aquila aritmetik optimizasyonu yöntemini geliştirmiştir. Covid-19'a yakalanmış 4, sağlıklı 4 X-ray görüntüsü, 4 renkli ve 4 gri seviye görüntü üzerinde

$m=3, 4, 5, 6$ seviye eşikleme yapılmış, önerilen yöntem SSA, WOA, PSO, AO (Aquila Optimizasyonu) ile kıyaslanmıştır. Wang vd. [24] eşikleme problemi için birleştirilmiş mutasyon ve benzerliğin kaldırılmasına dayalı WOA algoritmasını geliştirmiştir. 10 gri görüntü için $m=2, 4, 6, 8$ seviyeli segmentasyon yapılmış, iterasyon sayısı 300 kullanılmıştır.

Literatürde her yıl onlarca MSA tanıtılmaktadır. Buna bağlı olarak pek çok MSA ve değiştirilmiş versiyonları çoklu eşikleme ile segmentasyon probleminin çözümüne uygulanmaktadır. Meta-sezgisel yöntemler doğaları gereği kullandıkları parametre sayısı, iterasyon sayısı ve iterasyon işlem adımlarında farklılıklar göstermektedir. Bir algoritma bir iterasyon adımı bir komşuluk hesaplarken, diğer bir algoritma birden fazla komşu çözüm hesaplayabilir. Bu durumda algoritma amaç fonksiyonunu bir iterasyonda birden fazla çağırılmaktadır. Bu ise adaletli bir kıyaslama yapmaya engel olmaktadır. Çok seviyeli segmentasyon konusunda yapılan çalışmalarda genellikle sonlandırma kriteri olarak iterasyon sayısı kullanılmıştır ve bu iterasyon sayıları farklılıklar göstermektedir. Oysaki sonlandırma kriterinin optimizasyon sürecinin sonuçları üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu parametrenin değeri çözümlerin kalitesini ve en iyi çözümü bulan algoritmaları değiştirebilmektedir. Algoritmaların adil olarak kıyaslanabilmesi için bu çalışmada sonlandırma kriteri olarak maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı, $maxFEs=500*d$ (d : eşik seviye sayısı) ve $maxFEs=1000*d$ kullanılmıştır.

Eşiklemeye dayalı görüntü segmentasyon problemleri için çok farklı fonksiyonlar geliştirilmiş olsa da literatürde genel olarak Kapur entropisi [1] ve Otsu kriteri [2] en çok kullanılan yöntemlerdir. Kapur entropisinin genel kullanımı ve başarımı nedeniyle çalışmada eşikleme fonksiyonu olarak Kapur entropisi tercih edilmiştir.

Segmentasyon probleminin çözümünde önerilen MSA'lar sınırlı sayıda (2-8 arası) rakip algoritma ile kıyaslanmıştır. Her çalışma farklı rakiplerle kıyaslama yaparak kendi yönteminin daha iyi olduğunu belirtmektedir. Fakat genel olarak bu algoritmaların neden seçildiği ile ilgili bir bilgiye rastlanılmamaktadır. Bu çalışmada görüntü segmentasyonu literatüründeki çalışmalarda modifiye edilme ya da rakip olma açısından en çok kullanılan algoritmaların başarımları kıyaslanmıştır. Literatürde her yıl çok sayıda MSA önerilmektedir. Bu algoritmaların artık geçerliliği ve başarımları da sorgulanmaya başlanmıştır. Bu nedenle çalışmada segmentasyon literatüründe en çok kullanılmış, geçerliliği kabul edilmiş, pek çok farklı problemin çözümünde de başarılı olmuş 11 MSA'nın görüntü segmentasyondaki başarımları değerlendirilmiştir.

Çalışmalarda genellikle az sayıdaki görüntüler üzerinden sonuçlar rapor edilmektedir. Bu ise büyük veri kümeleri söz konusu olduğunda algoritmaların gerçek başarımları ile ilgili bilgi sağlamamaktadır. Çalışmada Berkeley segmentasyon veri setinin test kümesinde bulunan 100 görüntü kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece algoritmaların gerçek segmentasyon performanslarının değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu açıdan bu çalışma yapılacak görüntü

segmentasyonu çalışmalarında algoritma seçimi konusunda araştırmacılara ışık tutacak niteliktedir.

Literatürdeki çalışmalardaki diğer bir problem ise görüntülerin segmentasyonunda kullanılan eşik seviye sayısıdır. Çalışmaların çoğunda düşük sayıda eşik seviyesi (2, 3, 4, 5) kullanılmıştır. Dolayısıyla algoritmanın orta ya da yüksek eşik seviye sayısı kullanıldığında nasıl bir performans göstereceği bilinmemektedir. Bu çalışmada belirlenen algoritmalarla 100 görüntünün $m=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ seviyeli segmentasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın ana katkıları aşağıdaki gibidir.

-Çok seviyeli görüntü eşiklemeyle dayalı görüntü segmentasyonu literatüründe en çok kullanılan ABC [25], CS [26], DE [27], GWO [28], HHO [29], MFO [30], PSO [31], SCA [32], SOS [33], SSA [34], WOA [35] algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır.

-Algoritmaların adil şekilde kıyaslanabilmesi için sonlandırma kriteri olarak maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı, $maxFEs=500*d$ (d :eşik seviye sayısı) ve $maxFEs=1000*d$ kullanılmıştır.

-Algoritmaların performansı Berkeley segmentasyon veri setinin Test klasöründe bulunan 100 görüntü üzerinde değerlendirilmiştir.

- $m=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ seviyeli segmentasyon ile algoritmaların düşük ve orta seviye eşiklerdeki başarımları değerlendirilmiştir.

-Friedman istatistiksel analiz yöntemi ile algoritmaların performansı değerlendirilmiştir.

Yazı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde çok seviyeli eşikleme problemi, üçüncü bölümde MSA'ların genel yapısı ve deneylerde kullanılan algoritmalar açıklanmıştır. Kullanılan veri seti, deneysel çalışmalar ve bulgular dördüncü bölümde verilmiş, elde edilen sonuçlar beşinci bölümde tartışılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Çok seviyeli eşikleme problemi

Eşikleme gri ya da renkli görüntülerdeki piksellerin, görüntü segmentasyonu amacıyla, parlaklık değerlerine göre ayrı sınıflara sınıflandırılması işlemidir. Görüntüdeki sınıfların doğru seçilebilmesi için optimal eşik değerinin belirlenmesi gerekir. Bu eşik değeri kullanılarak görüntü [Denklem \(1\)](#) ile iki sınıfa ayrılabilir.

$$\begin{aligned} C_1 &\leftarrow p & \text{if } 0 \leq p < th \\ C_2 &\leftarrow p & \text{if } th \leq p < L \end{aligned} \quad (1)$$

Denklemden L görüntüdeki gri seviye sayısını, p $m \times n$ boyutlu görüntüdeki herhangi bir pikseli, th belirlenen eşik değerini ifade etmektedir. Burada C_1 ve C_2 th eşik değerine göre ayrılan iki sınıfı temsil etmektedir. Bir eşik değerine göre yapılan ve o eşik değerinden küçük olan pikselleri C_1 , eşik değerine eşit ve büyük olanları ise C_2 sınıfına atayan bu yöntem iki seviyeli eşikleme olarak adlandırılmaktadır. Bu yapı çok sayıda eşik değeri kullanılarak, çok sayıda sınıf içeren görüntü oluşturulmasını sağlayan çoklu eşiklemeyle temel oluşturur ([Denklem \(2\)](#)).

$$\begin{aligned} C_1 &\leftarrow p & \text{if } 0 \leq p < th_1 \\ C_2 &\leftarrow p & \text{if } th_1 \leq p < th_2 \\ C_i &\leftarrow p & \text{if } th_i \leq p < th_{i+1} \\ C_n &\leftarrow p & \text{if } th_n \leq p < L \end{aligned} \quad (2)$$

Denklemden th 'ler farklı eşik değerlerini ifade etmektedir. Buradaki amaç, iki ya da çok seviyeli eşikleme kullanarak görüntüde farklı karakteristiğe sahip bölgeleri en iyi şekilde sınıflandıracak eşik değerlerinin belirlenmesidir. Renkli görüntülerde bu eşik değerleri 3 kanal içinde ayrı ayrı işlem yapılarak belirlenir.

Görüntüdeki nesnelere ve arka plan arasında iyi bir ayrım yapacak eşik değerlerinin belirlenmesinde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlardan en başarılı olan ve eşik değerlerinin belirlenmesinde sıklıkla parametrik olmayan amaç fonksiyonu olarak kullanılan Kapur entropisi aşağıda açıklanmaktadır

Kapur entropisi [1], segmente edilen sınıfların entropi değerlerine göre optimal eşik değerlerini belirleyen bir eşikleme yöntemidir. Kapur entropisi görüntü histogramındaki gri seviyelerin olasılık dağılımlarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. $[th_1, th_2, \dots, th_n]$ 'nin görüntüyü sınıflara ayırmak için kullanılacak eşik değerleri olduğu varsayılırsa, Kapur yöntemindeki amaç fonksiyonu [Denklem \(3\)](#)'teki gibidir.

$$\begin{aligned} H(th_1, th_2, \dots, th_n) &= H_0 + H_1 + \dots + H_n \\ H_0 &= - \sum_{j=0}^{th_1-1} \frac{p_j}{\omega_0} \ln \frac{p_j}{\omega_0}, & \omega_0 &= \sum_{j=0}^{th_1-1} p_j \\ H_1 &= - \sum_{j=th_1}^{th_2-1} \frac{p_j}{\omega_1} \ln \frac{p_j}{\omega_1}, & \omega_1 &= \sum_{j=th_1}^{th_2-1} p_j \\ H_n &= - \sum_{j=th_n}^{L-1} \frac{p_j}{\omega_n} \ln \frac{p_j}{\omega_n}, & \omega_n &= \sum_{j=th_n}^{L-1} p_j \end{aligned} \quad (3)$$

Denklemlerde $H_1, H_2 \dots H_n$ sınıf entropilerini, $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_n$, sınıf olasılıklarını, p_j j . renk değerinin olasılığını, L ise maksimum renk değerini ifade etmektedir. Amaç fonksiyonunun maksimize edilmesi ile optimal eşik değerleri elde edilmektedir. Problemin yukarıda verilen denklemlerle çözümünün işlem karmaşıklığı, eşik sayısının artışına bağlı olarak üstel olarak artmaktadır. Bu nedenle denklemden verilen amaç fonksiyonunu maksimize edecek eşik değerlerinin belirlenmesi n boyutlu bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir ve [Denklem \(4\)](#) ile ifade edilir.

$$t^* = \arg \max \left(\sum_{i=1}^n H_i \right) \quad (4)$$

2.2 Meta-sezgisel algoritmalar

Popülasyona dayalı arama yöntemleri olan MSA'lardaki arama süreci genel olarak iki ana adımdan oluşur. İlk adımda, benimsenen seçim yöntemine bağlı olarak popülasyondan çözüm adayları (arama uzayındaki referans konumları) seçilir. İkinci adımda seçilen referans konumları kullanılarak arama işlemi gerçekleştirilir. İkinci adım

MSA'ların arama operatörleri tarafından gerçekleştirilir. Arama operatörlerinin görevi, sömürü (exploitation) ve keşif (exploration) gereksinimlerini karşılamaktır. Referans konumlarına (seçim sürecindeki çözüm adayları) yakın bir aramaya komşuluk araması adı verilir. Amaç, seçilen çözüm adaylarının yakınındaki en iyi pozisyonu (çözüm) keşfetmektir. Çeşitlilik, arama sürecindeki iyileşmenin tamamen durduğu veya başarılı çözümlerin elde edilemediği durumlarda, popülasyonu yerel çözüm tuzaklarından kurtarma görevidir. Çeşitlilik görevini yerine getirmek için referans konumlarında etkili bir değişiklik sağlamak amacıyla mutasyon gibi bir işlem uygulanır. Çeşitlilik süreci, arama alanındaki referans konumlarından daha başarılı olan konumların keşfedilmesine olanak sağlamalıdır.

MSA'ların farklı arama özellikleri vardır. Bazı MSA'lar rakiplerine göre daha hızlı arama yapabilmekte ve yerel çözümleri kolaylıkla bulabilmektedir. Ancak çoğu MSA, birçok yerel çözüm tuzağı olan arama uzaylarında çeşitlilik sağlayamaz ve erken yakınsama sorunu yaşar. Karmaşık arama uzaylarında çeşitliliği başarıyla sağlayan ve sömürü-keşif dengesini koruyan algoritmalar, etkin bir şekilde küresel çözüme yakınsayabilir. MSA'lar optimizasyon sürecinde benzer adımlardan oluşan bir döngüyü takip ederler. Bu işlem adımları **Algoritma 1**'de verilmiştir.

Algoritma 1. MSA algoritmalarında arama sürecinin genel adımları [36]

- 1) Optimizasyon probleminin tanımlanması (amaç fonksiyonu, tasarım parametreleri vd.)
- 2) Algoritma parametrelerinin tanımlanması ve çözüm adayları topluluğunun oluşturulması
- 3) Aday çözümlerin uygunluk değerlerinin hesaplanması
- 4) Arama Süreci Yaşam Döngüsü
 - a. Seçim süreci
 - b. Komşuluk araması ve çeşitliliğin sağlanması
 - c. Çözüm adayı topluluğunun güncellenmesi
- 5) Sonlandırma kriteri sağlandı mı?
 - a. Hayır (Adım 4'e dön)
 - b. Evet (Arama sürecini sonlandır ve en iyi çözüm adayını kaydet)

Bu çalışmada çok seviyeli görüntü eşiklemeyle dayalı görüntü segmentasyonu literatüründe en çok kullanılan ABC [25], CS [26], DE [27], GWO [28], HHO [29], MFO [30], PSO [31], SCA [32], SOS [33], SSA [34], WOA [35] algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Bu algoritmalar sonraki alt bölümlerde açıklanmıştır.

2.2.1 Yapay arı kolonisi (ABC) algoritması

ABC algoritması arıların yiyecek arama davranışlarının modellenmesi ile geliştirilmiştir [25]. Yiyecek arama süreci, yiyecek kaynağının değeri, türü, yuvaya yakınlığı, nektar konsantrasyonu veya nektarın elde edilmesinin kolaylığı gibi birçok faktöre bağlıdır. ABC algoritmasında koloni üç grup arıdan oluşur: işçi arılar, kaşif arılar ve gözcü arılar. İşçi arılar, daha önceden keşfedilen kaynaklardan kovana yiyecek getirilmesinden sorumludur. Her besin kaynağı için yalnızca bir yapay işçi arının olduğu varsayılmaktadır. İşçi arılar ziyaret ettikleri kaynağın kalitesi ve yeriyle ilgili bilgiyi diğer arılara iletirler. Besin kaynağı terk edilen işçi arı kaşif yada gözcü arı olur. Kaşif arılar yeni besin kaynağı bulmak için arayışa başlar. Gözcü arılar ise işçi arıların

davranışlarını izlerler ve işçi arıların paylaştığı bilgiyi kullanarak yeni bir kaynağa yönelirler. Arı kolonilerinin yiyecek kaynaklarının konumları çözülmek istenen problemin muhtemel çözümlerine, nektar miktarı ise çözümün kalitesini ifade etmektedir.

ABC algoritmasında başlangıç değerlerinin üretilmesi, SN yiyecek kaynağı sayısı ve M optimize edilecek parametre sayısı olmak üzere, **Denklem (5)** ile gerçekleştirilir.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand(0,1) * (x_j^{max} - x_j^{min}), \quad (5)$$

$i=1, \dots, SN \quad j=1, \dots, M$

x_i çözümünün görevli arısı için yeni kaynak üretimi **Denklem (6)** ile hesaplanırken, bu kaynağın maliyet değeri, $f(v_i)$, **Denklem (7)**'de yerine koyularak uygunluk değeri elde edilir. Gözcü arılar ise seçme işlemini **Denklem (8)**'de verilen olasılık değerine göre yapar.

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} * (x_{ij} - x_{kj}) \quad (6)$$

$$uygunluk_i = \begin{cases} 1/(1 + f_i), & f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i), & f_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$p_i = \frac{uygunluk}{\sum_{i=1}^{SN} uygunluk} \quad (8)$$

2.2.2 Guguk kuşu arama (CS) algoritması

Yang ve Deb [26] tarafından önerilen guguk kuşu algoritması, guguk kuşlarının kuluçka paraziti davranışından ilham alan meta-sezgisel bir algoritmadır. Guguk kuşu bir seferde bir yumurta bırakır ve bunu rasgele olarak diğer kuş türlerinin yuvalarına bırakır. Ev sahibi kuşlar, guguk kuşu yumurtasını kuluçkaya yatırabilir ve yumurtadan çıkarabilir veya izinsiz giren yumurtayı $P_\alpha \in (0,1)$ olasılıkla tanıyıp yuvayı terk edebilir. Guguk kuşu algoritması adımları aşağıda verilmiştir.

Öncelikle her bir guguk kuşu x_i^{t-1} yuvasını rasgele ve x_i^t yuvasını Levy flight kullanarak seçer. Daha sonra bu yuvalar F fonksiyonu ile değerlendirilir. Eğer $F(x_i^t) > F(x_i^{t-1})$ ise guguk kuşu x_i^{t-1} 'yi x_i^t ile değiştirir ve x_i^t yuvasına bir yumurta bırakır. Daha sonra t . adımdaki tüm yuvaları sıralayarak en iyi yuvayı bulur. Bu sırada bazı kötü yuvalar P_α olasılığı ile terk edilir ve yenileri inşa edilir. Yeni bir yuva (ya da çözüm) x_i^{t+1} ise **Denklem (9)** ile hesaplanır. Denklemde $step_length$ Levy dağılımıyla ilişkili adım uzunluğu, α ise ağırlık katsayısıdır.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \times step_length \quad (9)$$

2.2.3 Diferansiyel evrim (DE) algoritması

DE algoritması [27], genetik algoritmalarındaki çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi operatörleri kullanan popülasyona dayalı bir algoritmadır. Genetik algoritmalarda daha iyi çözümler oluşturmada çaprazlama kullanılırken, DE'de mutasyon işlemi kullanılır. Bu temel işlem,

popülasyondaki rastgele örneklenen çözüm çiftlerinin farklılıklarına dayanır.

D parametreden oluşan bir optimizasyon görevi D boyutlu bir vektörle temsil edilebilir. DE'de başlangıçta NP çözüm vektörlerinden oluşan bir popülasyon rastgele oluşturulur. Bu popülasyon mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri uygulanarak başarılı bir şekilde iyileştirilir.

Her $x_{i,G}$ hedef vektörü için mutant vektörü Denklem (10) ile üretilir.

$$v_{i,G+1} = x_{i,G} + K. (x_{r_1,G} - x_{i,G}) + F. (x_{r_2,G} - x_{r_3,G}) \quad (10)$$

Denklemden $i, r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ rasgele seçilmeli birbirinden farklı olmalıdır. F ölçekleme K ise kombinasyon faktörüdür. Çaprazlama işleminde ana vektör, mutasyona uğramış vektörle karıştırılarak $u_{j,G+1}$ deneme vektörleri üretilir (Denklem (11)).

$$u_{j,G+1} = \begin{cases} v_{j,G+1} & \text{if } (rnd_j \leq CR) \text{ or } j = rn_i \\ q_{j,G} & \text{if } (rnd_j > CR) \text{ or } j \neq rn_i \end{cases} \quad (11)$$

Denklem 11'de $j = 1, 2, \dots, D$; $r_j \in [0,1]$ rasgele bir sayı, $CR \in [0,1]$ çaprazlama sabiti ve $rn_i \in (1, 2, \dots, D)$ rasgele seçilen bir indekstir.

Popülasyondaki tüm çözümler, uygunluk değerlerine bağlı olmaksızın ebeveyn olarak seçilme şansına sahiptir. Mutasyon ve çaprazlama işlemlerinden sonra üretilen çocuk değerlendirilir. Daha sonra, çocuk vektörünün ve ebeveyninin performansı karşılaştırılır ve daha iyi olan seçilir. Ebeveyn hala daha iyiyse, popülasyonda tutulur.

2.2.4 Gri kurt optimizasyon (GWO) algoritması

GWO algoritması [28], gri kurtların sosyal hiyerarşik yapısından ve akıllı avlanma yönteminden esinlenmiştir. Gri kurtların yaşamında katı bir sosyal hiyerarşi vardır. Bir gri kurt sürüsünün liderleri alfadır. Bireyler alfa tarafından verilen karara uymalıdır. Sonraki seviye betadır. Beta, alfanın danışmanıdır ve sürüyü disiplin altına almaktan sorumludur. Sürüdeki en zayıf seviye, omegadır. Omega seviyesindeki kurtlar, diğer bireylerin emirlerine uymak zorundadır ve yiyecek yemelerine izin verilen son kurtlardır. Alfa, beta ve omega dışındaki kalan kurtlar, delta olarak adlandırılır. Delta seviyesindeki kurtlar, alfa ve beta kurtlarına itaat eder ve omega kurtlarına hükmeder.

Gri kurtların avlanması üç ana bölümden oluşur: (1) Avı izleme, kovalama ve yaklaşma. (2) Avı takip etme, kuşatma ve hareket etmeyi bırakana kadar taciz etme. (3) Ava saldırma. Avlanma sırasında en iyi çözüm α olarak kabul edilir. İkinci ve üçüncü en iyi çözümler sırasıyla β ve δ olarak kabul edilir ve diğer çözümler ω olduğu varsayılır. Avlanma (optimizasyon) α , β ve δ tarafından yönlendirilir ve ω ise onları takip eder. Avın konumunu keşfetmek için birbirlerinden ayrılırlar ve sonra ava saldırmak için birleşirler. Gri kurtların ayrışmasını matematiksel olarak modellemek için \vec{A} kullanılabilir. \vec{A} , arama ajanını avdan ayırmaya zorlamak için 1'den büyük veya ava yaklaştırmak için 1'den küçük değer alan rastgele bir vektördür ve bu da

GWO'daki küresel aramayı vurgular. $\vec{A} > 1$ olduğunda, gri kurt daha iyi çözümler aramak için avdan uzaklaşmaya (yerel optimum) zorlanır. $\vec{A} < 1$ olduğunda ise aday çözümler avda birleşir. Bu süreç durdurma kriterlerinin karşılanıncaya kadar devam eder. Algoritmadaki av arama süreci Denklem (12) ile modellenmiştir.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (12)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}$$

$\vec{X}_p(t)$ avın pozisyonunu, $\vec{X}(t)$ kurdun pozisyonunu, \vec{D} ise kurdun yeni pozisyonunun hesaplanmasında kullanılan vektörü ifade etmektedir. \vec{A} ve \vec{C} katsayı vektörleri olup Denklem (13) ile hesaplanır.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (13)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2$$

Burada \vec{a} iterasyonlar boyunca 2'den 0'a lineer olarak azalan bir vektördür. \vec{r}_1 ve \vec{r}_2 ise $[0,1]$ aralığında rasgele vektörlerdir.

2.2.5 Harris şahini optimizasyon (HHO) algoritması

HHO algoritması [29], Harris şahinlerinin avını keşfetme, sürpriz saldırı ve farklı saldırı stratejilerinden esinlenerek önerilmiştir. HHO, popülasyona dayalı, eğimsiz bir optimizasyon tekniğidir. HHO'da, Harris şahinleri rastgele bazı konumlara tüneler ve iki stratejiye dayalı olarak bir av tespit etmeyi bekler. Her tüneme stratejisi için eşit bir q şansı düşünülürse, diğer aile üyelerinin konumlarına ve tavşana göre ($q < 0.5$), ya da rastgele uzun ağaçlara ($q \geq 0.5$) tüneler (Denklem (14)).

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1 | X_{rand}(t) - 2r_2 X(t) & q \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3 (LB + r_4 (UB - LB)) & q < 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

Denklemden $X(t+1)$ şahinin sonraki iterasyondaki konumunu, $X_{rabbit}(t)$ tavşanın konumunu, $r_1, r_2, r_3, r_4 (0,1)$ aralığında rasgele sayıları, LB ve UB ise değişkenlerin alt ve üst sınırlarını ifade etmektedir. $X_{rand}(t)$ mevcut popülasyondan rastgele seçilen bir şahin ve $X_m(t)$ ise mevcut şahin popülasyonunun ortalama konumudur.

HHO algoritması keşiften sömürüye geçebilir ve ardından avın kaçma enerjisine bağlı olarak farklı sömürücü davranışlar arasında geçiş yapabilir. $E = 2E_0(1 - t/T)$ ile modellenen avın enerjisi, kaçma davranışı sırasında önemli ölçüde azalır. Burada, E avın kaçma enerjisi, T maksimum yinleme sayısı ve E_0 ise enerjisinin başlangıç durumudur. HHO'da, E_0 her yinlemede $(-1, 1)$ aralığı içinde rastgele değişir. E_0 'ın değeri 0'dan -1'e düştüğünde tavşan fiziksel olarak zayıflıyor, 0'dan 1'e çıktığında ise tavşan güçleniyor anlamına gelir. Avlar her zaman tehdit edici durumlardan kaçmaya çalışırlar. Av ne yaparsa yapsın, şahinler avı yakalamak için sert veya yumuşak bir kuşatma gerçekleştirecektir. $E < 0.5$ olduğunda yumuşak kuşatma, $E \geq 0.5$ olduğunda ise sert kuşatma gerçekleşir.

2.2.6 Güve-alev optimizasyonu (MFO) algoritması

MFO algoritması, güvelerin navigasyon davranışından esinlenilerek geliştirilmiştir [30]. Güvelerin geceleri özel bir navigasyon yöntemleri vardır. Güveler ay ışığını kullanarak geceleri uçmak üzere evrimleşmişlerdir. Navigasyon için enine yönelim adı verilen bir mekanizma kullanırlar. Bu yöntemde, bir güve, uzun mesafeleri düz bir yolda kat etmek için çok etkili bir mekanizma olan aya göre sabit bir açıyı koruyarak uçar. Ay, güveden çok uzakta olduğundan, bu mekanizma düz bir çizgide uçmayı garanti eder.

MFO algoritmasında, aday çözümlerin güveler olduğu ve problemin değişkenlerinin güvelerin uzaydaki konumları olduğu varsayılır. Bu nedenle güveler, konum vektörlerini değiştirerek 1-B, 2-B, 3-B veya hiper boyutlu uzayda uçabilirler. Algoritmada güveler ve alevlerin her ikisi de çözümdür. Aralarındaki fark, her yinelemede ele alınma ve güncellenme şekilleridir. Güveler, arama alanında hareket eden arama ajanlarıdır, alevler ise güvelerin o ana kadar elde ettiği en iyi konumdur. Her güve bir alevin etrafında arama yapar ve daha iyi bir çözüm bulması durumunda onu günceller. Bu mekanizma ile bir güve asla en iyi çözümünü kaybetmez. Güvelerin güncelleme mekanizması logaritmik bir spiral olup Denklem (15)'le modellenmiştir.

$$S(M_i, F_i) = D_i e^{bt} \cos(2\pi t) + F_j \quad (15)$$

$$D_i = |F_j - M_i|$$

Denklemden D_i i . güvenin j . aleve olan uzaklığını, b logaritmik spiral şeklini tanımlayan sabiti, t ise $[-1,1]$ aralığında rasgele bir sayıyı ifade eder. Denklemden görüldüğü gibi güvenin sonraki konumu aleve göre belirlenmektedir. t parametresi, güvenin bir sonraki pozisyonunun aleve ne kadar yakın olması gerektiğini tanımlar ($t = -1$ aleve en yakın pozisyon, $t = 1$ ise en uzak pozisyonu gösterir)

2.2.7 Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritması

PSO'da [31] bir dizi basit varlık (parçacıklar) bir problemin veya fonksiyonun arama alanına yerleştirilir ve her biri mevcut konumunda hedef fonksiyonu değerlendirir. Daha sonra her parçacık, kendi mevcut ve en iyi (en iyi uyum) konumlarını, sürünün bir veya daha fazla üyesinin konumlarıyla birleştirilerek arama alanındaki hareketini belirler. Bu sayede sürünün bir bütün olarak, uyum fonksiyonunun bir optimumuna doğru hareket etmesi sağlanır.

Parçacık sürüsündeki her birey, üç D -boyutlu vektörden oluşur. Bunlar, geçerli konum \vec{x}_i , önceki en iyi konum \vec{p}_i ve hız \vec{v}_i 'dir. D arama alanının boyutudur. Algoritmanın her yinelemesinde, geçerli konum bir problem çözümü olarak değerlendirilir. Bu konum, şu ana kadar bulunanlardan daha iyiyse, koordinatlar ikinci vektör olan \vec{p}_i 'de saklanır. Şimdiye kadarki en iyi fonksiyon sonucunun değeri, daha sonraki yinelemelerde karşılaştırma için $pbest_i$ 'de saklanır. Amaç, daha iyi konumlar bulmaya ve \vec{p}_i ve $pbest_i$ 'yi güncellemeye devam etmektir. Yeni noktalar, \vec{x}_i 'ye \vec{v}_i koordinatları eklenerek seçilir ve algoritma, adım boyutu olarak görülebilen \vec{v}_i 'yi ayarlayarak çalışır.

Algoritmada her parçacık için, optimizasyon uygunluk fonksiyonu değerlendirilir. Bu değer parçacığın $pbest_i$ 'si ile karşılaştırılır. Mevcut değer $pbest_i$ 'den daha iyiyse, $pbest_i$ mevcut değere, \vec{p}_i D boyutlu uzaydaki mevcut konum \vec{x}_i 'ye eşitlenir. Şimdiye kadar komşuluk içindeki en iyi başarıya sahip parçacık belirlenir ve endeksini g değişkenine atanır. Daha sonra parçacığın hızı ve konumu Denklem (16)'ya göre değiştirilir.

$$\begin{cases} \vec{v}_i \leftarrow \vec{v}_i + \vec{U}(0, \phi_1) \otimes (\vec{p}_i - \vec{x}_i) + \vec{U}(0, \phi_2) \otimes (\vec{p}_g - \vec{x}_i) \\ \vec{x}_i \leftarrow \vec{x}_i + \vec{v}_i \end{cases} \quad (16)$$

2.2.8 Sinüs kosinüs algoritması (SCA)

SCA algoritması [32], optimizasyon problemlerini çözmek için sinüs/kosinüs matematiksel fonksiyonlarına dayanmaktadır. Stokastik popülasyon tabanlı optimizasyon algoritmalarının ortak özelliği optimizasyon sürecinin iki faza bölünmesidir: keşif ve sömürü. İlk fazda, optimizasyon algoritması, arama alanının umut verici bölgelerini bulmak için, çözümler kümesindeki rastgele çözümleri yüksek bir rastgelelik oranıyla birleştirir. Sömürü fazında ise, rastgele çözümlerde kademeli değişiklikler olur ve rastgele varyasyonlar keşif fazındakilerden çok daha azdır. SCA algoritmasında, her iki faz için Denklem (17)'deki konum güncelleme ifadeleri önerilmiştir.

$$\begin{cases} X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| \\ X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| \end{cases} \quad (17)$$

Denklemden X_i^t mevcut çözümün i . boyutta t . iterasyondaki konumunu, r_1, r_2, r_3 rasgele sayıları, P_i hedefin i . boyuttaki pozisyonunu ifade etmektedir. Bu iki denklem $[0,1]$ aralığında rasgele değer alan r_4 e göre Denklem (18)'deki gibi birleştirilir.

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| & r_4 < 0.5 \\ X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

Yukarıdaki denklemlerin gösterdiği gibi, SCA'da dört ana parametre vardır: r_1, r_2, r_3 ve r_4 . r_1 parametresi, çözüm ile hedef arasındaki veya dışındaki alanda olabilen bir sonraki konumun bölgesini (veya hareket yönünü) belirler. r_2 parametresi, hareketin hedefe veya hedefin dışına doğru ne kadar uzakta olması gerektiğini tanımlar. r_3 parametresi, hedefin mesafeyi tanımlamadaki etkisini stokastik olarak vurgulamak ($r_3 > 1$) veya önemsizleştirmek ($r_3 < 1$) için hedefe rastgele bir ağırlık katar. Son olarak, r_4 parametresi sinüs ve kosinüs bileşenleri arasında geçiş yapılmasını sağlar.

2.2.9 Simbiyotik organizmalar arama (SOS) algoritması

Doğadaki canlılar yaşamak için diğer canlılara ihtiyaç duyarlar. İki tür arasında var olan karşılıklı işbirliği simbiyotik olarak adlandırılır. SOS [33] algoritması doğadaki bu simbiyotik ilişkiden esinlenilerek geliştirilmiştir. Doğadaki simbiyotik bağların bazıları, karşılıklık (mutualism), ortakçılık (commensalism) ve asalaklık (parasitism)'tir. SOS, optimum global çözümü

arama sürecinde, arama alanındaki olası aday çözümlerden oluşan bir popülasyonu yinelemeli olarak kullanır. SOS, ekosistem adı verilen bir başlangıç popülasyonu ile başlar. Başlangıç ekosisteminde, bir grup organizma arama alanında rastgele oluşturulur. Her organizma, karşılık gelen soruna bir aday çözümü temsil eder.

SOS'ta X_i , ekosistemin i . üyesiyle eşleştirilmiş bir organizmadır. Daha sonra ekosistemden rastgele seçilen başka bir organizma X_j , X_i ile etkileşime girer. Her iki organizma da ekosistemde karşılıklı hayatta kalma (mutualizm) avantajını artırma amacıyla karşılıklı bir ilişkiye girer. X_i ve X_j , için yeni aday çözümler, (Denklem (19)), iki organizma arasındaki karşılıklı simbiyozu dayanarak hesaplanır.

$$\begin{aligned} X_{i_{new}} &= X_i + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual_vector * BF_1) \\ X_{j_{new}} &= X_j + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual_vector * BF_2) \\ Mutual_vector &= (X_i + X_j)/2 \end{aligned} \quad (19)$$

Denklemde BF_1 ve BF_2 fayda faktörleri olup rastgele 1 veya 2 olarak belirlenir. Bu faktörler her organizma için fayda düzeyini, yani bir organizmanın etkileşimden kısmen veya tamamen faydalanıp faydalanmadığını temsil eder. Organizmalar yalnızca yeni uygunlukları etkileşim öncesi uygunluklarından daha iyiyse güncellenirler.

Ortakçılıkta (commensalism) benzer şekilde ekosistemden rastgele seçilen bir organizma X_j , X_i ile etkileşime girer. Bu durumda, X_i etkileşimden faydalanmaya çalışır. Ancak, organizma X_j 'nin kendisi ilişkiden ne faydalanır ne de zarar görür. X_i 'nin yeni aday çözümü, organizma X_i ve X_j arasındaki ortak yaşam simbiyozu göre Denklem (20) ile hesaplanır.

$$X_{i_{new}} = X_i + rand(-1,1) * (X_{best} - X_j) \quad (20)$$

Asalaklıkta ise organizma X_i 'ye "Parasite_Vector" adı verilen yapay bir parazit yaratılır. Organizma X_j , ekosistemden rastgele seçilir ve parazit vektörüne konak görevi görür. Parasite_Vector, ekosistemde X_j 'nin yerini almaya çalışır. Parasite_Vector daha iyi bir uygunluk değerine sahipse, organizma X_j 'yi öldürür ve ekosistemdeki konumunu alır. X_j 'nin uygunluk değeri daha iyiyse, X_j parazite karşı bağışıklık kazanır ve Parasite_Vector artık o ekosistemde yaşayamaz.

2.2.10 zSalp sürüsü algoritması (SSA)

Salplar, Salpidae familyasına ait şeffaf, fiçı biçimli gövdeye sahip, dokuları deniz analarına benzeyen canlılardır. Salpların en ilginç davranışlarından biri, sürü halinde hareket etmeleridir. Derin okyanuslarda, salplar genellikle salp zinciri adı verilen bir sürü oluştururlar. Bu davranışın matematiksel modellenmesi ile SSA algoritması geliştirilmiştir [34]. Salp zincirlerini matematiksel olarak modellemek için, popülasyon önce iki gruba ayrılır: lider ve takipçiler. Lider, zincirin önündeki salp iken, geri kalan salplar takipçi olarak kabul edilir.

Diğer sürü tabanlı yöntemlere benzer şekilde, salpların pozisyonu n boyutlu bir arama alanında tanımlanır; burada

n , verilen bir problemin değişken sayısıdır. Bu nedenle, tüm salpların pozisyonu x adlı iki boyutlu bir matriste saklanır. Ayrıca, arama alanında sürünün hedefi olarak F adlı bir yiyecek kaynağının olduğu varsayılır. Liderin pozisyonunu güncellemek için Denklem (21) kullanılır.

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 \left((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j \right) & c_3 \geq 0 \\ F_j - c_1 \left((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j \right) & c_3 < 0 \end{cases} \quad (21)$$

Denklemde x_j^1 lider salpin j . boyuttaki pozisyonunu, F_j yiyecek kaynağının pozisyonunu, ub_j, lb_j sırasıyla j . boyuttaki üst ve alt sınırı, c_1, c_2, c_3 rasgele sayıları ifade eder. Takipçilerin konumu ise Denklem (22)'ye göre güncellenir. Denklemde $i \geq 2$, i . takipçi salpin j . boyuttaki konumunu, t zamanı, v_0 başlangıç hızını, ifade ederken $a = v_{final}/v_0$ ve $v = (x - x_0)/t$ dir.

$$x_j^i = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t \quad (22)$$

2.2.11 Balina optimizasyon algoritması (WOA)

WOA [35], kambur balinaların kabarcık ağı avlanma stratejisine dayalı olarak geliştirilen meta-sezgisel algoritmalarından biridir. Kambur balinalar genellikle su yüzeyine yakın küçük balık sürüleri tarafından beslenir. Kambur balinalar avlarına yaklaşırken hava kabarcıkları oluştururlar, böylece avlarını bir arada tutabilirler ve avlarına görülmenden yaklaşılabirler. Balina optimizasyon algoritması temel olarak 3 bölümden oluşur: avı çevreleme, kabarcık ağı avlanma ve av aramadır.

Kambur balinalar avın yerini tanıyabilir ve onları çevreleyebilir. Optimizasyon problemlerinde önceden bilinmeyen en iyi çözümler olarak, en iyi çözüm veya en iyi çözüme yakın bir nokta en iyi çözüm olarak kabul edilir. En iyi çözüm tanımlandıktan sonra, diğer çözümlerin konumları en iyiye göre güncellenir. Balinaların çevreleme davranışının matematiksel modeli Denklem (23)'te sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \vec{D} &= |\vec{C} \cdot \vec{X}_{best}(t) - \vec{X}(t)| \\ \vec{X}(t+1) &= \vec{X}_{best}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \end{aligned} \quad (23)$$

$\vec{X}_{best}(t)$ en iyi çözümü, \vec{A} ve \vec{C} katsayı vektörlerini ifade etmektedir. Bu vektörler Denklem (24) ile hesaplanır. Burada \vec{a} iterasyonlar boyunca 2'den 0'a lineer olarak azalan bir vektördür. \vec{r} ise [0,1] aralığında rasgele vektördür.

$$\begin{aligned} \vec{A} &= 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \\ \vec{C} &= 2 \cdot \vec{r} \end{aligned} \quad (24)$$

Av bulunduktan sonra av iki farklı hareketle, yani Küçülen Çevreleme Mekanizması ve Spiral Güncelleme Pozisyonu ile hareket eder. Spiral hareket için en iyi ajan ile arama ajanı arasındaki fark Denklem (25) ile hesaplanır. Burada b logaritmik spiral için sabiti, l ise [-1, 1] aralığındaki rastgele bir sayıyı ifade eder. D^{\rightarrow} en iyi arama ajanı ile mevcut arama ajanı arasındaki farktır.

$$X(t + 1) = \overline{D}^T \cdot e(bl) \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}_{best}(t) \quad (25)$$

3 Deneysel bulgular

3.1 Veri seti

Berkeley görüntü segmentasyonu veri seti [37] herkesin kullanımına açık olarak 200 eğitim ve 100 test verisi olmak üzere 300 görüntüden oluşmaktadır (BSD300). Veri seti gri seviyeli ve renkli görüntüler içermektedir. Bu veri seti doğal görüntülerden bitki, insan, yiyecek vb. nesneye özgü görüntülere kadar geniş bir yelpazedeki görüntülerden oluştuğu için segmentasyon çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada MSA'ların çok seviyeli görüntü segmentasyonu performanslarının karşılaştırılması amacıyla BSD300 veri setininin 100 renkli görüntüden oluşan test kümesi, BSD100 kullanılmıştır. BSD100 veri setinden rasgele seçilmiş görüntüler ve görüntülere ait histogramlar Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi görüntüler çeşitli parlaklık ve renk dağılımlarına sahiptir. Bu özellikler deneylerdeki hesaplama karmaşıklığını ve problem çeşitliliğini oluşturmaktadır.

3.2 Deneysel ayarlar

Deneylerde çok seviyeli görüntü eşiklemeyle dayalı görüntü segmentasyonu literatüründe en çok kullanılan ABC, CS, DE, GWO, HHO, MFO, PSO, SCA, SOS, SSA, WOA algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Algoritmaların adil şekilde kıyaslanabilmesi için sonlandırma kriteri olarak maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı, $maxFEs$ kullanılmıştır. 100x3 problem (her bir görüntü ve görüntünün her kanalı ayrı bir optimizasyon problemidir) $maxFEs=500*d$ ve $maxFEs=1000*d$ için çözülerek algoritmaların başarımları değerlendirilmiştir. Her problemin optimizasyonu sürecinde algoritmalar 25 kez koşturulmuştur. $m=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ seviyeli segmentasyon ile algoritmaların düşük ve orta seviye eşiklerdeki başarımları incelenmiştir. Deneyler, 12 GB RAM'e sahip ve Windows 11 çalıştıran AMD Ryzen 7 6800H 3.2 GHz CPU kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 11 MSA, 100 görüntü, 3 renk kanalı, 7 farklı eşik seviyesi, 2 farklı sonlandırma kriteri için toplamda 46200 deney yapılmış, elde edilen sonuçlar Friedman istatistiksel analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir. Deneylerde MSA'ların orijinal ayarları kullanılmıştır. Bu ayarlar Tablo 1'de verilmiştir.

3.3 İstatistiksel analiz

Friedman testi, çoklu test denemeleri arasındaki farklılıkları tespit etmek için kullanılan parametrik olmayan bir istatistiksel analiz yöntemidir. Bu test özellikle aynı denek üzerinde farklı yöntemlerden, algoritmalarından veya koşullardan birden fazla ölçümün alındığı durumlarda kullanışlıdır. Çalışmada istatistiksel analizler, 11 algoritma, 100 görüntü, 25 çalıştırma içermektedir. Görüntüler renkli olduğu için R, G ve B kanalları için ayrı ayrı çözümler üretilmiş ve ortalaması alınmıştır. Deneylerde kullanılan algoritmaların $m=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ seviyeli segmentasyon için, sonlandırma kriteri $maxFEs=500*d$ ve

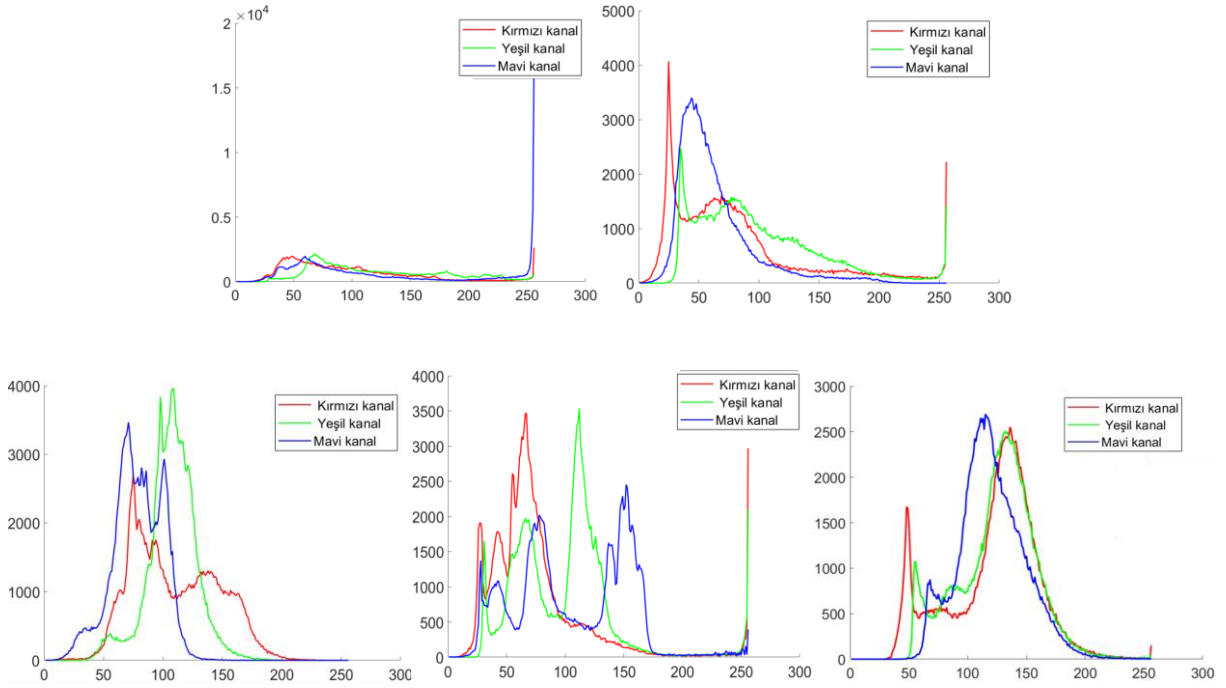
$maxFEs=1000*d$ seçildiğinde elde edilen deneysel verilerine ait Friedman sıralamaları ve skorları sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 1. MSA ayarları

Algoritma	Ayarlar
ABC	koloni boyutu = 50, SN = koloni boyutu/ 2, limit = D * SN
CS	yuva sayısı = 25, olasılık = 0.25, beta = 1.5
DE	popülasyon = 50, çaprazlama olasılığı = 0.2
GWO	arama ajan sayısı = 30
HHO	N = 30, Bfid = 1, nD = 10, Jr = 0.25
MFO	güve sayısı = 30
PSO	sürü boyutu = 30, bilişsel ve sosyal sabit = 2
SCA	arama ajan sayısı = 30, a = 2
SOS	ekosistem boyutu = 50
SSA	popülasyon = 30
WOA	popülasyon = 30

Tablo 2'deki sonuçlar incelendiğinde $maxFEs=500*d$ 'de tüm eşik seviyeleri için MFO algoritmasının rakiplerinden daha üstün başarı gösterdiği görülmektedir. MFO'yu yine tüm eşik seviyelerinde ikinci olarak PSO takip etmektedir. PSO'dan sonra başarılı olan algoritmalar ABC, GWO ve SSA'dır. Fakat eşik seviye sayısına göre bu algoritmaların sıralamadaki yeri değişmektedir. Örneğin $m=2, 3, 4, 5$ için SSA üçüncü başarılı algoritma olmuşken, $m=6, 7, 8$ için yerini ABC ye bırakmış ve sıralamada beşinciliğe düşmüştür. $maxFEs=500*d$ için $m=2$ eşik seviyesi hariç dördüncü sırada GWO algoritması yer almaktadır. Bu boyutta rakiplerine kıyasla en başarısız algoritmaların DE, SOS ve SCA olduğu görülmektedir.

Tablo 3'teki sonuçlar ise algoritmaların biraz daha şans verildiğinde bazı eşik seviyelerindeki sıralamaların değişebileceğini göstermektedir. $maxFEs=1000*d$ boyutunda da MFO algoritması 7 farklı durumdan 4'ünde en başarılı algoritma olmayı başarmıştır. $m=3, 4, 5$, ve 6 seviyeli eşiklemede MFO birinci, PSO ikinci en başarılı algoritma olmayı başarmıştır. $m=7, 8$ seviyeli eşiklemede bu algoritmalar yer değiştirmiş, $m=2$ seviyeli eşiklemede ise ABC'den sonra ikinci ve üçüncü başarılı algoritmalar olmuştur. Tablodaki sonuçlar ABC algoritmasının $maxFEs=1000*d$ boyutunda, $500*d$ boyutuna göre sıralamada daha üste çıktığını göstermektedir. $maxFEs=500*d$ boyutunda genelde dördüncü ve beşinci sırada yer alan ABC algoritması $maxFEs=1000*d$ boyutunda $m=2$ seviyeli eşiklemede en başarılı, geri kalan tüm durumlarda ise en başarılı üçüncü algoritma olmayı başarmıştır. Bu boyutta da ilk beşe giren algoritmalar değişmemiş ve MFO, PSO, ABC, SSA ve GWO olarak belirlenmiştir. En başarısız algoritmalar ise yine $maxFEs=500*d$ boyutundaki gibi DE, SOS ve SCA'dır.



Şekil 1. Berkeley veri setinden örnek görüntüler ve histogramları (soldan sağa: '102061.jpg', '55073.jpg', '208001.jpg', '299086.jpg', '126007.jpg', '86068.jpg')

Tablo2. $maxFEs=500*d$ için MSA'ların Friedman skorları ve sıralamaları

	m=2		m=3		m=4		m=5		m=6		m=7		m=8
MFO	3.59	MFO	2.55	MFO	2.44	MFO	2.52	MFO	2.59	MFO	2.63	MFO	2.76
PSO	3.69	PSO	2.80	PSO	2.83	PSO	2.90	PSO	2.91	PSO	2.82	PSO	2.85
SSA	4.34	SSA	3.96	SSA	4.24	SSA	4.35	GWO	4.41	ABC	4.32	ABC	4.13
ABC	4.36	GWO	4.52	GWO	4.45	GWO	4.46	ABC	4.46	GWO	4.43	GWO	4.42
GWO	4.74	ABC	4.92	ABC	4.85	ABC	4.62	SSA	4.46	SSA	4.55	SSA	4.62
WOA	5.53	WOA	5.67	WOA	5.72	WOA	5.68	WOA	5.61	WOA	5.64	WOA	5.58
DE	7.14	CS	7.73	CS	7.37	CS	7.18	CS	7.07	HHO	6.95	HHO	6.78
HHO	7.37	HHO	7.74	HHO	7.61	HHO	7.41	HHO	7.18	CS	7.00	CS	6.90
SOS	7.50	DE	7.99	DE	7.81	DE	7.77	DE	7.77	DE	7.81	DE	7.87
CS	7.91	SOS	8.00	SOS	8.41	SOS	8.69	SOS	8.97	SOS	9.14	SOS	9.28
SCA	9.84	SCA	10.10	SCA	10.26	SCA	10.43	SCA	10.56	SCA	10.70	SCA	10.80

Tablo3. $maxFEs=1000*d$ için MSA'ların Friedman skorları ve sıralamaları

	m=2		m=3		m=4		m=5		m=6		m=7		m=8
ABC	4.81	MFO	3.40	MFO	3.00	MFO	2.94	MFO	2.86	PSO	2.89	PSO	2.85
MFO	4.94	PSO	3.63	PSO	3.33	PSO	3.17	PSO	3.06	MFO	2.98	MFO	3.19
PSO	5.04	ABC	3.75	ABC	4.08	ABC	4.22	ABC	4.24	ABC	4.11	ABC	3.90
GWO	5.26	SSA	4.27	SSA	4.29	SSA	4.35	GWO	4.32	GWO	4.40	GWO	4.46
SSA	5.27	GWO	4.42	GWO	4.36	GWO	4.36	SSA	4.53	SSA	4.64	SSA	4.80
DE	5.32	CS	5.94	CS	6.21	CS	6.16	CS	6.20	CS	6.15	CS	6.04
CS	5.45	WOA	6.58	WOA	6.49	WOA	6.36	WOA	6.23	WOA	6.15	WOA	6.08
SOS	5.98	HHO	7.25	HHO	7.03	HHO	6.91	HHO	6.67	HHO	6.52	HHO	6.29
WOA	6.62	SOS	8.11	DE	8.18	DE	8.08	DE	8.11	DE	8.14	DE	8.19
HHO	7.09	DE	8.24	SOS	8.59	SOS	8.90	SOS	9.12	SOS	9.24	SOS	9.36
SCA	10.22	SCA	10.43	SCA	10.43	SCA	10.54	SCA	10.67	SCA	10.77	SCA	10.85

Deneylerde her algoritma her bir problemin çözümü için 25 kez çalıştırılmış ve bu çalışmaların ortalama değerlerine göre analiz gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların her bir eşik seviyesi için 100 görüntü üzerinde ortalama, maksimum minimum amaç fonksiyon değerleri ve bunların standart sapmaları hesaplanmıştır. Tüm sonuçların yazıda verilmesi okunaklılığı azaltacağı için, **Tablo 4**'te çalışmadaki en zor problemler olan 7 ve 8 seviyeli eşikleme için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlara göre karmaşık segmentasyon problemlerinde MFO ve PSO algoritmaları diğerlerine kıyasla daha başarılı olmuştur.

Deneylerde oluşturulan 11 algoritmanın tüm eşik seviyelerinde elde ettikleri Friedman skorlarının ortalaması alınmış ve buna göre algoritmaların başarımlı sıralaması **Tablo 5**'te verilmiştir. Buna göre sonlandırma kriterinin değeri değiştirilse de 100 görüntünün 7 farklı seviyede segmentasyonu için eşik değerlerinin belirlenmesinde en başarılı algoritma MFO'dur. MFO'dan sonra en başarılı ikinci algoritma PSO olmuştur. $maxFEs=500*d$ için en başarılı üçüncü algoritma SSA iken $maxFEs=1000*d$ için en başarılı üçüncü algoritma ABC olmuştur. Bu iki algoritma haricinde GWO algoritması her iki boyutta da dördüncü başarılı algoritma olmuştur. Kıyaslanan algoritmalar

içerisinde her iki boyutta da en son sıralarda SOS ve SCA yer almıştır.

Tablo 5. Tüm eşik seviyeleri için MSA'ların Friedman skorlarının ortalamaları ve sıralamaları

	$maxFEs=500*d$		$maxFEs=1000*d$
MFO	2.73	MFO	3.33
PSO	2.97	PSO	3.43
SSA	4.36	ABC	4.16
GWO	4.49	GWO	4.51
ABC	4.52	SSA	4.59
WOA	5.64	CS	6.02
HHO	7.29	WOA	6.36
CS	7.31	HHO	6.82
DE	7.74	DE	7.75
SOS	8.57	SOS	8.47
SCA	10.38	SCA	10.56

Tablo 4. m=7 ve m=8 seviyeli eşikleme için 11 algoritmanın ortalama, maksimum, minimum amaç fonksiyonu değerleri ve bu değerlerin standart sapmaları

Alg.	m=8				m=7			
	Ortalama	Maksimum	Minimum	Standart Sapma	Ortalama	Maksimum	Minimum	Standart Sapma
<i>maxFEs=1000*d</i>								
MFO	41.65331993	41.65587	41.65084	0.001130394	38.23118	38.23287	38.22897897	0.001029826
PSO	41.60941586	41.62171	41.59296	0.007431853	38.19773	38.20793	38.18189274	0.006950524
SSA	41.5843474	41.60567	41.56166	0.01017246	38.16061	38.17695	38.14113213	0.010501344
GWO	41.55595642	41.57991	41.53393	0.009269151	38.15412	38.16889	38.14088046	0.009005806
ABC	41.5619203	41.58368	41.52593	0.01183809	38.16718	38.18059	38.15384417	0.007058496
WOA	41.50074068	41.5175	41.48246	0.009370277	38.10939	38.12928	38.09305349	0.010601274
HHO	41.46251154	41.48834	41.43519	0.014847444	38.05685	38.08395	38.02856409	0.015136133
CS	41.57828216	41.5873	41.57226	0.003312661	38.17621	38.18201	38.17012933	0.003322286
DE	41.42230015	41.43144	41.41507	0.004295581	38.06616	38.07373	38.05778563	0.003638793
SOS	41.26618141	41.27488	41.25511	0.004757537	37.94974	37.96448	37.92856	0.007057516
SCA	40.74269401	40.77262	40.7075	0.016734962	37.56756	37.59464	37.54990202	0.013026707
<i>maxFEs=500*d</i>								
MFO	38.1909059	38.20433	38.17594	0.007298532	41.60074	41.61391	41.577946	0.007731648
PSO	38.14199881	38.16432	38.11619	0.011826951	41.55368	41.58117	41.52137043	0.015437733
SSA	38.09651742	38.12051	38.07246	0.009808443	41.4858	41.52193	41.45777903	0.015207616
GWO	38.11646677	38.13597	38.10041	0.010294678	41.49625	41.51316	41.45418226	0.011920535
ABC	38.18535472	38.1885	38.18122	0.002252595	41.59216	41.59867	41.58793297	0.002389206
WOA	38.04812857	38.07017	38.01155	0.010926424	41.4236	41.44126	41.3902492	0.012552967
HHO	37.93275982	37.97205	37.89467	0.018413705	41.30365	41.35109	41.25536863	0.020864752
CS	38.03106156	38.04142	38.01559	0.006131919	41.39986	41.4105	41.38835807	0.005758005
DE	37.97516332	37.9844	37.96256	0.004927146	41.31267	41.32692	41.29685073	0.008065821
SOS	37.83039607	37.84897	37.81315	0.007562737	41.10877	41.125	41.09285678	0.010480436
SCA	37.41279261	37.43207	37.39356	0.011854887	40.56236	40.59452	40.5266354	0.017762358

4 Tartışma ve sonuçlar

Bu çalışmada ABC, CS, DE, GWO, HHO, MFO, PSO, SCA, SOS, SSA, WOA algoritmalarının çok seviyeli görüntü segmentasyonu performansları karşılaştırılmıştır. Algoritmaların sonlandırma kriteri olarak maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı, $maxFEs$, kullanılmış, problemler $maxFEs=500*d$ ve $maxFEs=1000*d$ için çözülmüştür. BSD100 veri setindeki görüntülerin $m=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ seviyeli segmentasyonu gerçekleştirilmiştir.

Görüntü segmentasyonu literatüründe pek çok MSA ve değiştirilmiş versiyonları problemin çözümüne uygulanmaktadır. Meta-sezgisel yöntemler doğaları gereği her iterasyonda işlem adımları açısından farklılıklar gösterir. Bir algoritma bir iterasyon adımıyla amaç fonksiyonunu bir kez çağırırken diğeri birden fazla çağırabilir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde genelde sonlandırma kriteri olarak iterasyon sayısının kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada sonlandırma kriteri olarak maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısının kullanılması algoritmaların daha adil kıyaslanmasını sağlamış, $maxFEs=500*d$ ve $maxFEs=1000*d$ için algoritmaların başarı sıralamasında

değişimler olduğu görülmüştür. Bu ise sonlandırma kriterinin optimizasyon sürecinin sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu parametrenin değeri çözümlerin kalitesini ve en iyi çözümü bulan algoritmaları değiştirebilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda önerilen algoritmaların az sayıda rakiple kıyaslandığı ve bu algoritmaların seçim sebebi ile ilgili herhangi bir bilgi verilmediği görülmüştür. Ayrıca her yıl geliştirilen onlarca algoritmanın seçilen 5-10 görüntüden oluşan kısıtlı bir veri kümesi üzerindeki başarısı genel bir başarımlık olarak değerlendirilememektedir. Bu nedenle bu çalışmada segmentasyon literatüründe en çok kullanılmış, 11 MSA'nın görüntü segmentasyondaki başarımları değerlendirilmiştir. Deneyler Berkeley segmentasyon veri setinin test klasöründeki 100 görüntü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Böylece algoritmaların gerçek segmentasyon performanslarının değerlendirilmesi sağlanmıştır. Çalışmaların çoğunda düşük sayıda eşik seviyesi (2, 3, 4, 5) kullanılmıştır. Dolayısıyla algoritmanın orta ya da yüksek eşik seviye sayısı kullanıldığında nasıl bir performans göstereceği bilinmemektedir. Bu çalışmada 100

görüntünün $m=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ seviyeli segmentasyonu gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlarda en başarılı iki algoritmanın MFO, PSO olduğu görülmüştür. MFO'nun keşiften sömürüye geçerek erken aşamada hızlı bir yakınsamaya olanak sağlaması yöntemin verimliliğini artırmaktadır [30]. PSO ise global optimumları bulmada daha yüksek verimliliğe, karmaşık problemleri çözmek için doğru matematiksel modeller oluşturma yeteneğine ve hızlı yakınsama hızına sahip bir algoritmadır [31]. Yeterli şans verildiğinde ABC'nin üçüncü başarılı, daha hızlı çözüm elde edilmek istendiğinde SSA'nın üçüncü en iyi algoritma olduğu görülmüştür. 11 algoritma içerisinde en başarısız olanlar DE, SOS ve SCA olarak belirlenmiştir. Bu açıdan bu çalışma yapılacak görüntü segmentasyonu çalışmalarında algoritma seçimi konusunda araştırmacılara ışık tutacak niteliktedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] J. N. Kapur, P. K. Sahoo and A. K. Wong, A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer vision, graphics and image processing*, 29 (3), 273-285, 1985. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90125-2).
- [2] N. Otsu, A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, 62-66, 1979 <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
- [3] M. Sezgin and B.L. Sankur, Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic imaging*, 13(1), 146-168, 2004. <https://doi.org/10.1117/1.1631315>.
- [4] P. Y. Yin and L. H. Chen. A fast iterative scheme for multilevel thresholding methods. *Signal processing*, 60(3), 305-313, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(97\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(97)00080-7).
- [5] P. Y. Yin, Multilevel minimum cross entropy threshold selection based on particle swarm optimization. *Applied mathematics and computation*, 184(2), 503-513, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.06.057>.
- [6] M. H. Horng, A multilevel image thresholding using the honey bee mating optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 215(9), 3302-3310, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.10.018>.
- [7] M. H. Horng and R. J. Liou, Multilevel minimum cross entropy threshold selection based on the firefly algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(12), 14805-14811, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.069>.
- [8] B. Akay, A study on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithms for multilevel thresholding. *Applied Soft Computing*, 13(6), 3066-3091, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.03.072>.
- [9] A. K. Bhandari, V. K. Singh, A. Kumar, and G. K. Singh, Cuckoo search algorithm and wind driven optimization-based study of satellite image segmentation for multilevel thresholding using Kapur's entropy. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3538-3560, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.059>.
- [10] S. Pare, A. Kumar, V. Bajaj, and G. K. Singh, An efficient method for multilevel color image thresholding using cuckoo search algorithm based on minimum cross entropy. *Applied Soft Computing*, 61, 570-592, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.08.039>.
- [11] A. K. M. Khairuzzaman, and S. Chaudhury, Multilevel thresholding using grey wolf optimizer for image segmentation. *Expert Systems with Applications*, 86, 64-76, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.029>.
- [12] M. Abd El Aziz, A. A. Ewees, and A. E. Hassanien, Whale optimization algorithm and moth-flame optimization for multilevel thresholding image segmentation. *Expert Systems with Applications*, 83, 242-256, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.023>.
- [13] B. Küçükuğurlu, and E. Gedikli, Symbiotic organisms search algorithm for multilevel thresholding of images. *Expert Systems with Applications*, 147, 113210, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113210>.
- [14] P. D. Sathya, R. Kalyani, and V. P. Sakthivel, Color image segmentation using Kapur, Otsu and minimum cross entropy functions based on exchange market algorithm. *Expert Systems with Applications*, 172, 114636, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114636>.
- [15] E. H. Houssein, B. E. D. Helmy, D. Oliva, A. A. Elngar, and H. Shaban, A novel black widow optimization algorithm for multilevel thresholding image segmentation. *Expert Systems with Applications*, 167, 114159, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.e.swa.2020.114159>.
- [16] A. K. Bhandari, A. Kumar, and G. K. Singh, Modified artificial bee colony based computationally efficient multilevel thresholding for satellite image segmentation using Kapur's, Otsu and Tsallis functions. *Expert systems with applications*, 42(3), 1573-1601, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.049>.
- [17] L. He, and S. Huang, Modified firefly algorithm based multilevel thresholding for color image segmentation. *Neurocomputing*, 240, 152-174, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.02.040>.
- [18] J. Anitha, S. I. A. Pandian, and S. A. Agnes, An efficient multilevel color image thresholding based on modified whale optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 178, 115003, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115003>.
- [19] T. Rahkar Farshi, and A. K. Ardabili, A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm applied to multilevel image thresholding. *Multimedia Systems*, 27(1), 125-142, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00530-020-00716-y>.




- [20] M. Abd Elaziz, D. Mohammadi, D. Oliva, and K. Salimifard, Quantum marine predators algorithm for addressing multilevel image segmentation. *Applied Soft Computing*, 110, 107598, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107598>.
- [21] L. Qiao, K. Liu, Y. Xue, W. Tang, and T. Salehnia, A multi-level thresholding image segmentation method using hybrid Arithmetic Optimization and Harris Hawks Optimizer algorithms. *Expert Systems with Applications*, 241, 122316, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122316>.
- [22] F. S. Gharehchopogh, and T. Ibrikci, An improved African vultures optimization algorithm using different fitness functions for multi-level thresholding image segmentation. *Multimedia Tools and Applications*, 83(6), 16929-16975, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16300-1>.
- [23] L. Abualigah, N. K. Al-Okbi, E. M. Awwad, M. Sharaf, and M. S. Daoud, Boosted Aquila Arithmetic Optimization Algorithm for multi-level thresholding image segmentation. *Evolving Systems*, 15, 1399-1426, 1-28, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12530-023-09566-1>.
- [24] J. Wang, J. Bei, H. Song, H. Zhang, and P. Zhang, A whale optimization algorithm with combined mutation and removing similarity for global optimization and multilevel thresholding image segmentation. *Applied Soft Computing*, 137, 110130, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110130>.
- [25] D. Karaboga, and B. Basturk, Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. In *International Fuzzy Systems Association World Congress*, pp. 789-798, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72950-1_77.
- [26] X. S. Yang, and S. Deb, Cuckoo search via Lévy flights. In *2009 World Congress On Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, pp. 210-214, 2009. <https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393690>.
- [27] R. Storn, and K. Price, Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
- [28] 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>.
- [29] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97, 849-872, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>.
- [30] S. Mirjalili, Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. *Knowledge-based systems*, 89, 228-249, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.006>.
- [31] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33-57, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>.
- [32] S. Mirjalili, SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 96, 120-133, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022>.
- [33] M. Y. Cheng, and D. Prayogo, Symbiotic organisms search: a new metaheuristic optimization algorithm. *Computers & Structures*, 139, 98-112, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>.
- [34] 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>.
- [35] 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>.
- [36] H. T. Kahraman, S. Aras, and E. Gedikli, Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for metaheuristic search algorithms. *Knowledge-Based Systems*, 190, 105169, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105169>.
- [37] The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark, <https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds/>





Derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile sosyal medya verilerinden suç tespiti

Crime detection on social media data using deep learning and machine learning methods

Sultan Zeybek^{*1} , Berat Alkın² , Yusuf Kaya³ 

¹ Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Yapay Zeka ve Veri Mühendisliği Bölümü, 34015, İstanbul, Türkiye

^{2,3} Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 34015, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Türkçe sosyal medya paylaşımlarındaki tehdit ve hakaret içeriklerinin tespiti amaçlanmıştır. Doğal Dil İşleme teknikleri kullanılarak sosyal medya verileri üzerinde derin öğrenme algoritmalarıyla modeller geliştirilmiş ve bu modeller makine öğrenmesi algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Türkçe sosyal medya verilerinden toplanan veri kümesi etiketlenerek Uzun Kısa Süreli Bellek ve BERT derin öğrenme modelleri ile suç tespiti amacıyla kullanılmıştır. Derin öğrenme modelleri, makine öğrenmesi modellerinden Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman ve Gradyan Artırma modelleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen derin öğrenme modelleri, %90 doğruluk oranıyla tehdit ve hakaret içeriklerini başarılı bir şekilde tespit ederek makine öğrenmesi modellerine kıyasla daha üstün performans sergilemiştir.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Makine öğrenmesi, Sosyal medya, Suç tespiti, Sınıflandırma

1 Giriş

İnternet kullanımının hızla yaygınlaşması ve sosyal medya platformlarının sayısının artmasıyla birlikte dijital ortamlarda üretilen içerik miktarı da önemli ölçüde artmıştır. Sosyal medya siteleri hem dünyada hem de Türkiye'de en çok ziyaret edilen web siteleri arasında yer almakta ve kullanıcılarına düşüncelerini özgürce paylaşma imkânı sunmaktadır. Ancak, bu platformlar aynı zamanda suç içeriklerinin, özellikle tehdit ve hakaret unsurlarının yayılmasına da zemin hazırlamaktadır. Tehdit ve hakaret gibi suçlar, bireylerin manevi dünyasına yönelik saldırılar içerir ve bu nedenle, bu içeriklerin tespit edilmesi hukuki süreçlerin işleyişi açısından büyük önem taşır [1].

Tehdit ve hakaret suçları, Türk Ceza Kanunu (TCK) kapsamında bireylerin manevi dünyasını koruyan önemli suç tiplerindedir [2]. Tehdit suçu, TCK'nın 106. maddesinde düzenlenmiş olup, bir kişiyi kendisinin ya da bir yakınının hayatına, vücut bütünlüğüne veya cinsel dokunulmazlığına zarar vereceği yönünde tehdit etmeyi kapsar. Bu suç, yalnızca gerçek kişilere karşı işlenebilir ve somut bir zarara yol açmasa da mağduru korkutmaya yönelik her türlü tehdit suç olarak kabul edilir. Hakaret suçu ise TCK'nın 125.

Abstract

This study aims to detect threats and insults in Turkish social media posts. Models have been developed using Natural Language Processing techniques and deep learning algorithms, and the proposed models have been compared with machine learning algorithms. The dataset, collected from Turkish social media posts, has been labelled and used for crime detection in social media using Long Short-Term Memory and BERT deep learning models. The deep learning models have been compared with machine learning models such as Support Vector Machines, Random Forest, and Gradient Boosting. The proposed deep learning models have outperformed the machine learning models, successfully detecting threatening content with an accuracy of 90%.

Keywords: Deep learning, Machine learning, Social media, Crime detection, Classification

maddesinde düzenlenmiştir ve bir kimsenin onur, şeref ve saygınlığını zedeleyecek nitelikte hakaret veya isnatlarda bulunmayı içerir. Bu suç da yalnızca gerçek kişilere karşı işlenir ve kişinin toplumsal itibarını korumayı hedefler. Sosyal medya platformlarında bu tür suçların doğru tespit edilmesi, kamu güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Son yıllarda sosyal medya platformlarındaki hakaret, tehdit ve nefret içeriklerinin tespitine yönelik yapılan çalışmalar, yapay zeka ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımların bu alanda etkin çözümler sunduğunu göstermektedir. Karayığıt ve arkadaşlarının çalışmasında, Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) gibi derin öğrenme yöntemlerinin Türkçe yorumlar üzerinde yüksek doğruluk oranıyla hakaret içeriklerini tespit edebildiği kanıtlanmıştır [3]. Benzer şekilde, Bozyığıt ve arkadaşları siber zorbalık gibi çevrimiçi şiddet içeriklerinin yapay sinir ağları ile başarıyla tespit edilebileceğini vurgulamaktadır [4]. Facebook zorbalığı ve mağduriyeti ölçeklerinin Türkçe 'ye uyarlanması çalışmasında, zorbalık ve mağduriyet konularında Türkçe 'ye uygun ölçekler geliştirilmiş; ancak bu çalışma doğrudan makine öğrenmesi yöntemlerine

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: szeybek@fsm.edu.tr (S. Zeybek)

Geliş / Received: 18.09.2024 Kabul / Accepted: 14.11.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1551734

odaklanmamıştır [5]. Kaynar vd. çeşitli öznitelik seçim yöntemleri kullanılarak saldırı tespit sistemleri için başarılı modeller geliştirilmiş ve saldırı ve tehdit içeriklerinin makine öğrenmesi yardımıyla nasıl tespit edilebileceğini göstermiştir [6]. Bu tür teknolojik çözümler, sosyal medya ve çevrimiçi platformlarda yaygın olarak kullanılan dilsel saldırıların tespitinde büyük bir ilerleme kaydetmiştir.

Türkçe sosyal medya verileri üzerinde nefret söylemi tespitine yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Nefret söylemi, toplumsal ayrımcılığı körükleyen ve bireylere ya da topluluklara yönelik düşmanca, aşağılayıcı ifadelerden oluşan bir suç kategorisidir. Sosyal medya platformlarının yaygın kullanımıyla birlikte bu tür içerikler hızla artmıştır. Beyhan ve arkadaşları Türkçe nefret söylemi veri kümesi ve tespit sistemi çalışması ile Türkçe sosyal medya içeriklerinde nefret söylemi tespiti için bir veri kümesi geliştirilmiş ve BERT gibi derin öğrenme tekniklerinin kullanımı incelenmiştir [7]. Çalışmada geliştirilen So-haTRED modeli ile makine öğrenmesi ile derin öğrenme yöntemlerinin hibrit bir yapı içinde birleştirilerek nefret söylemi tespitinde başarılı sonuçlar elde vereceği gösterilmiştir. Türkçe nefret söylemi tespiti için TurkishBERTweet modelinin kullanıldığı bir başka çalışma VRLab at HSD-2Lang ortamında geliştirilmiştir. Bu model, sosyal medya platformlarında yayılan nefret içeriklerinin tespiti için düşük-rank adaptasyonu (LoRA) ile ince ayar yapılmış ve yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır [8]. Bir diğer çalışmada ChatGPT modelinin Türkçe sosyal medya gönderilerinde nefret söylemi tespitindeki yeteneklerini incelenmiştir. Çalışmada, modelin özellikle dilin karmaşık yapılarında ne derece etkili olduğunu ve nefret söylemini tespit etme kapasitesini değerlendirerek derin öğrenme yöntemleri ile karşılaştırmalı bir analiz sunmaktadır [9]. Bayrak ve arkadaşları çalışmasında, BERT-Base modelinin Türkçe sosyal medya gönderilerinde nefret söylemi tespitinde %92.53 test doğruluğu ile başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermişlerdir. [10]. Benzer bir çalışmada Hierarchical Attention Network (HAN) ve BERT tabanlı derin öğrenme modelleri ile nefret söylemi tespiti üzerinde durulmuş ve eleştirel söylem analizinden elde edilen dilsel özelliklerle yüksek doğruluk oranlarına ulaşılmıştır [11].

Bu çalışmalar, BERT tabanlı modellerin Türkçe nefret söylemi tespitinde ne derece etkili olduğunu göstermektedir. Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı belirli platformlara ve spesifik içerik türlerine odaklanmaktadır ve genel tehdit veya hakaret suçlarını kapsayan geniş çaplı bir model geliştirilmemiştir. Aynı zamanda, Özar'ın çalışmasında dile getirildiği gibi, Türkiye'deki nefret suçlarına yönelik yasal düzenlemelerin kapsamı da bu teknolojik gelişmelerle tam anlamıyla entegre edilmemiştir [12]. Türkçe saldırgan ifadeler içeren dil kullanımı üzerine hazırlanmış ilk veri kümesi Çöltekin [13] tarafından Twitter'dan toplanmış hakaret ve nefret söylemi içeren ifadelerle Türkçe dil yapısının ve sosyal medyadaki gayri resmi dil kullanımının özelliklerini göz önüne sermiştir. Bu veri kümelerinin genişletilerek, hakaret ve tehdit içeriklerinin tespiti ve sınıflandırılması için makine öğrenmesi ve derin öğrenmemodellerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde hem hukuki hem de teknolojik alanlarda hakaret

ve tehdit içeriklerinin daha geniş çaplı ve etkin bir şekilde tespitine ve önlenmesine yönelik bir boşluk olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla Türkçe dilinde hakaret ve tehdit suçlarının daha kapsamlı tespiti için makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı bir model önerilmektedir. Çalışmanın temel amacı tehdit ve hakaret içeren paylaşımların tespit tehdit ve hakaret içeriklerinin tespitine yönelik doğal dil işleme tekniklerinin etkinliğini incelemektir. Bunun için Türkçe sosyal medya paylaşımlarından suç içeriklerini tespit etmek amacıyla derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemleri geliştirilmiştir ve önerilen modeller üzerinden performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde geliştirilen sınıflandırma modelinde kullanılan makine öğrenmesi ve derin öğrenme metodlarına yer verilmiştir. Veri kümesi ve veri ön işleme aşamalarından bahsedilerek karşılaştırmalı performans sonuçları raporlanmıştır. Son olarak sonuçlar ve gelecek çalışmalar önerileri ile çalışma sonlandırılmıştır.

2 Materyal ve metod

Türk Hukukuna dayalı suç tespiti problemi, bir duygu analizi problemi değildir. Bir Türkçe cümlenin tehdit ya da hakaret ifadesi içeriyor olmasını belirleyebilmek için, cümlenin genel anlamını öğelerden anlayabilmek ve Türk kanunlarına göre karar verebilmek gerekir.

Bu çalışmada, Türkçe hakaret ve tehdit suçlarının tespiti bir metin sınıflandırma problemi olarak ele alınmıştır. Metin sınıflandırma, belirli bir metni içeriğine dayanarak hakaret, tehdit veya diğer suç kategorilerine ayırma sürecini ifade eder. Bu işlem, genellikle denetimli makine öğrenmesi teknikleri ile gerçekleştirilir ve modelin doğru sınıfları öğrenebilmesi için etiketlenmiş veriler kullanılır.

Çalışmanın ilk aşamasında hakaret ve tehdit içeren sosyal medya gönderileri karşılık gelen sınıf etiketleri ile etiketlenerek veri seti oluşturulmuştur. Tehdit ve hakaret içerikleri yasal mevzuat doğrultusunda incelenmiş ve suç teşkil edebilecek içeriklerin belirlenmesine özen gösterilmiştir. Daha sonra veri ön işleme yöntemleri ile metin verisi standart bir forma dönüştürülerek makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının anlayabileceği sayısal özelliklere dönüştürülmüştür. Elde edilen eğitim verileri makine öğrenmesi yöntemlerin ve derin öğrenme yöntemleri ile eğitilerek sınıflandırma performansları elde edilmiştir. Modeller, eğitim süreçleri boyunca değerlendirilmiş ve önerilen modellerin doğruluğu test verileri üzerinde değerlendirilmiştir. Son aşamada ise, eğitim süreci tamamlanan model, yeni gelen metinleri hakaret ve tehdit içeriklerine göre sınıflandırmak amacıyla kullanılmıştır.

2.1 Veri seti ve veri ön işleme

Çalışma boyunca veri kümesi olarak Yıldız Teknik Üniversitesi Doğal Dil İşleme Grubu tarafından oluşturulan ve 20 milyon Türkçe tweet içeren geniş bir veri kümesi kullanılmıştır [14]. Veri kümesi, 2012 yılında çeşitli zaman dilimlerinde ve birçok farklı konuda atılmış rastgele tweetlerden oluşmaktadır. Bu veriler arasında siyaset, spor, eğlence ve gündelik konular gibi çeşitli kategoriler yer

almaktadır. Tweetlerin seçimi, rastgele örnekleme yöntemi ile yapılmıştır. Veri ön işleme kapsamında, tweetlerde bulunan kısaltmalar, hashtagler, emojiler ve bağlantılar gibi metin dışı içerikler zemberek-nlp kütüphanesi kullanılarak temizlenmiştir [15]. Daha sonra metinlerde yapılan yazım yanlışları düzeltilmiştir. Böylece aynı kelimelerin yazım hataları veya kısaltmalar nedeniyle farklı biçimlerde yazılmasının önüne geçilmiştir (Bk. [Tablo 1](#)). Normalizasyon sürecinde düzeltilemeyen yazım yanlışları elle düzeltilmiştir.

Tablo 1. Veri ön işleme öncesi ve sonrası

Tweet	Veri Ön işleme Sonrası
Yrn okua gidicem	Yarın okula gideceğim.
Tmm yarın havuza giricem ve aksama kadar yaticam	Tamam yarın havuza gireceğim ve akşama kadar yatacağım.
@zekikayahan alarm çaldıktan sonra kapatıp tekrar uyumanın #hastasiyim	Alarm çaldıktan sonra kapatıp tekrar uyumanın hastasiyim.

Daha sonra tweetlerde bulunan cümleler [Tablo 2](#)'de görüldüğü gibi kök ve eklerine ayrılarak anahtar kelime listesinde bulunan herhangi bir kelimeyi içeren cümleler kontrol listesine alınmıştır. Veriler tehdit, hakaret ve nötr olmak üzere üç ayrı sınıfa göre etiketlenmiştir. Veri etiketleme öncesinde, emsal hukuk davalarında geçen ifadeler dikkate alınmış ve tehdit ile hakaret içeriklerine yönelik anahtar kelimeler oluşturulmuştur. Bu kapsamda Türk Hukuku'nda yargıtay kararları kapsamında yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen hukuki dosyalardan ve örnek davalardan hakaret kelimelerinin ve tehdit kelimelerinin içeren bir anahtar liste oluşturularak bu listeye göre etiketleme işlemi yapılmıştır. Tehdit ve hakaret sınıfları her ne kadar benzer olsalar da bazı anlam farklılıkları içermektedir. Tehdit sınıfı için cümlenin bir kişiye zarar verme, kötü bir durum yaşatma niyetini içermesi gerekirken hakaret sınıflandırması için cümlenin kişinin itibarına saldırma, aşağılama veya küçümseme gibi unsurlar bulundurulması gerekmektedir. Tehdit içeren cümleler genellikle gelecekteki olası zararları öne çıkarırken, hakaret içeren cümleler kişinin karakterine veya yeteneklerine yönelik aşağılayıcı ifadeler içerir. Her iki durumda da, cümlenin bağlamını dikkate almak ve dilin tonunu anlamak önemlidir. Bu farkı gözetmek üzere önceden hazırlanmış olan ve tehdit unsuru oluşturabilecek kelimelerin olduğu liste kullanılarak kelime kökü 1. tekil/çoğul şahıs ekleriyle veya kelime kökü gelecek/geniş zaman ekleriyle kullanılan cümlelerin olduğu tehdit anlamı içerebilecek tweetler etiketlenmek üzere ayıklanmıştır. Ayrıca incelenen sosyal medya verilerinde geçen argo ifadeler de, TCK Madde 125 kapsamında hakaret suçu olarak değerlendirilmiştir. Etiketleme sonucunda her bir sınıfa ait 1000 adet tweet içeren veri kümeleri oluşturulmuştur. Nötr sınıfa ait verilerden 500 adet veri hakaret veya tehdit sınıfından kelimeleri içermesine rağmen, tehdit-hakaret anlamı içermeyecek şekilde olması sağlanmıştır. Ayrıca Levenshtein uzaklığı algoritması kullanılarak birbirine çok fazla benzeyen veriler ile yeni veriler değiştirilmiştir.

Tablo 2. Kök ve eklerle ayırma öncesi ve sonrası

Ön işlemeden geçmiş tweet	Kök ve eklerle ayırma sonrası
Ahmaklar anca böyle düşünür zaten	ahmak Adj Zero Noun A3pl an Noun A3sg Equ böyle Adj düşün Verb Aor A3sg zaten Adv
donarak öl aptal	don Verb ByDoingSo Adv ol Verb Imp A2sg aptal Adj
seni öldüreceğim	sen Noun A3sg P1sg Acc öldür Verb Fut A1sg.

Ön işleme sürecinde veri setinde bulunan etkisiz kelimeler (stopwords) listesi çıkarılmış ve minimum belge sıklığı kriteri uygulanmıştır. Python'un scikit-learn kütüphanesindeki CountVectorizer fonksiyonu kullanılarak kelime çantası (Bag of Words) modeli ile veri kümesi vektörize edilmiştir. Vektörizasyon sonrası elde edilen kelime frekansları analiz edilerek en sık geçen kelimeler [Tablo 3](#)'te sunulmuştur. Özellikle, veride sık geçen küfür, tehdit ve hakaret içeren kelimelerin yüksek frekanslarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, çalışma kapsamında incelenen veri kümesinin doğasına uygun olup, söz konusu içeriklerin etkili bir şekilde sınıflandırılması için önemli bir temel oluşturmaktadır.

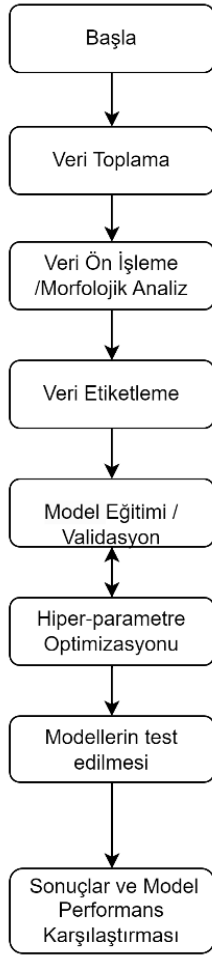
Tablo 3. Veri setinde en çok sıklığa sahip kelimeler

Kelime	Sıklığı / Frekansı
*mına	167
lan	133
or*spu	128
s*keceğim	122
ö*düreceğim	116

2.2 Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemleri

Çalışma boyunca makine öğrenmesi yöntemlerinden Destek Vektör Sınıflandırıcısı (DVS), Rastgele Orman Sınıflandırıcısı (ROS), Gradyan Artırma Sınıflandırıcısı (GAS) kullanılmıştır. DVS, makine öğrenmesi alanında sınıflandırma problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan güçlü bir algoritmadır. Bu algoritma, bir veri noktasının hangi sınıfa ait olduğunu belirlerken, sınıflar arasındaki en uygun karar sınırlarını bulmaya odaklanır [16]. DVS, sınıflar arasındaki boşluğu maksimize ederek karar sınırlarını belirler. Bu karar sınırları, "destek vektörleri" olarak adlandırılan ve sınıflar arasında en kritik olan veri noktalarına dayanarak çizilir. Algoritma, veri noktalarını bir vektör uzayında temsil eder ve bu uzayda en iyi ayırma çizgisini bulur [17]. [Şekil 1](#), önerilen makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinin iş akış şemasını göstermektedir.

ROS, bir dizi karar ağacından oluşan güçlü bir sınıflandırma ve regresyon modelidir. Bu model, her bir karar ağacının farklı özellik ve veri alt kümeleri üzerinde eğitilmesi ile oluşturulur. Karar ağaçları, veri kümesindeki özelliklere dayalı olarak basit karar kuralları oluşturur ve veri noktalarını sınıflandırır. Rastgele Orman algoritması, her bir ağacın bağımsız olarak tahmin yapmasını sağlar ve bu tahminlerin ortalaması alınarak veya çoğunluk kararıyla nihai sonuç elde edilir [18].



Şekil 1. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinin iş akış şeması.

Bu algoritmanın önemli bir avantajı, yüksek boyutlu ve karmaşık veri kümeleri üzerinde etkili bir şekilde çalışabilmesidir. Ayrıca, aşırı uyum (overfitting) eğilimini azaltarak modelin genelleme kapasitesini artırır. Bu, her bir ağacın rastgele alt kümeler üzerinde eğitilmesi sayesinde sağlanır ve modelin farklı veri alt kümeleri ve özellikler üzerinde öğrenme yapabilmesi mümkün olur. GAS, zayıf öğrenicilerin ardışık olarak bir araya getirilmesiyle güçlü bir sınıflandırıcı oluşturan bir makine öğrenimi yöntemidir. Bu algorithmada, her bir öğrenici, önceki tahmincilerin yaptığı hataları düzeltmeye çalışarak performanslarını artırır. Bu sayede genel hata azalır ve daha güçlü bir model elde edilir [19]. Öğrenme sırasında her iterasyonda kayıp fonksiyonu optimize ederek tahminlerin gerçek değerlerden ne kadar uzak olduğunu ölçülür ve bu farkın minimize edilmesi için gradyan inişi optimizasyonu kullanılır. GAS, genellikle yüksek doğruluk sağlar, aykırı verilere karşı dirençlidir ve çoğu sınıflandırma görevinde diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterir. Bununla birlikte, aşırı uyum riskini azaltmak için modelin parametrelerinin dikkatli bir şekilde ayarlanması gereklidir [20].

Derin öğrenme, makine öğrenmesinin bir alt dalı olup, çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak karmaşık veri örüntülerini modellemeye odaklanmaktadır. Böylece düşük

seviyeli özelliklerden yüksek seviyeli özelliklerin öğrenildiği hiyerarşik bir özellik öğrenme süreci sağlar. Bu çalışma kapsamında derin öğrenme metodlarından Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), ve BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) modelleri kullanılmıştır.

LSTM modeli özellikle zaman serisi verileri ve sıralı veri analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir tekrarlayan sinir ağı (Recurrent Neural Network, RNN) mimarisidir. LSTM'ler, geleneksel RNN'lerin uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme konusundaki zayıflıklarını gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Sepp Hochreiter ve Jürgen Schmidhuber tarafından 1997 yılında sunulan makalelerinde tanımlanan LSTM'lerin en büyük yeniliği, uzun süreli bağımlılıkları öğrenme kapasitesine sahip bir bellek hücresine ve bilgi akışını yöneten unutmama kapısı (forget gate), giriş kapısı (input gate) ve çıkış kapısı (output gate) olmak üzere üç kapı sistemine sahip olmalarıdır [21]. Bu kapılar, hangi bilgilerin bellekte tutulacağı, hangi bilgilerin güncelleneceği ve hangi bilgilerin çıktı olarak verileceği konusunda karar vererek modelin uzun süreli bağımlılıkları daha etkin bir şekilde öğrenmesini sağlamaktadır.

BERT, doğal dil işleme alanında kullanılan bir model olup, çift yönlü dönüştürücülerden elde edilen temsilciliği ifade eder. Google tarafından 2018 yılında tanımlanan BERT, çeşitli NLP görevlerinde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. BERT'in temel yeniliği, çift yönlü eğitim süreci sayesinde bağlamı hem sol hem de sağ yönden anlayabilmesidir. Bu özellik, modelin cümle içindeki kelimelerin anlamını daha iyi kavramasına olanak tanır. BERT'in mimarisi, Transformer modeline dayanmakta olup, metin temsilciliğini öğrenmek için dikkat (attention) mekanizmasını kullanır [22].

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde oluşturulan veri kümesi üzerinde uygulanan sınıflandırma modelleri sonucu elde edilen bulgular verilmiştir.

Makine öğrenmesi modellerinin eğitimi için, scikit-learn kütüphanesi kullanılarak çeşitli algoritmalar uygulanmış ve hiperparametre optimizasyonu Grid Search ve Cross Validation yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Eğitim ve test isabet oranları karşılaştırılarak aşırı uyum (overfitting) riski minimize edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Modellerin performans değerlendirmeleri sonucunda, elde edilen sınıflandırma doğruluğu, makine öğrenmesi algoritmalarının etkinliğini göstermiştir.

Derin öğrenme aşamasında, Google Colab ortamında LSTM ve BERT modelleri geliştirilmiştir. LSTM modeli en fazla 5 devir boyunca eğitilmiştir. Devir sayısı modellerin aşırı öğrenmesini (overfitting) önleyerek aşırı uyuma gitmeden en iyi performansa ulaşmasını sağlamak amacıyla küçük tutulmuştur. Öğrenme oranı için learning rate ayarı yapılmış ve modellerin performansını optimize etmek amacıyla erken durdurma (early stopping) stratejisi kullanılmıştır.

3.1 Deneysel sonuçlar

Sınıflandırma modellerinin performansı çeşitli metriklerle değerlendirilmiştir. Performans ölçütleri

arasında aşağıdaki denklemlerle ifade edilen doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1 skoru (F1 score) yer almaktadır.

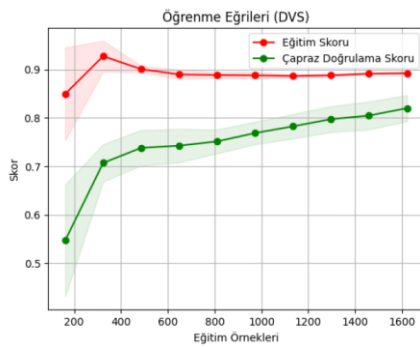
Doğruluk, modelin tüm veri kümesinde ne kadar doğru tahmin yaptığını gösterir ve doğru pozitifler (TP, True Positives) ile doğru negatiflerin (TN, True Negatives) toplam tahminler içindeki oranı olarak hesaplanır. Kesinlik, modelin pozitif olarak tahmin ettiği örnekler arasında gerçekten doğru olanların oranını ifade eder. Bu, doğru pozitiflerin (TP) yanlış pozitifler (FP, False Positives) ile birlikte toplam pozitif tahminler içindeki oranıdır. Duyarlılık (recall), modelin aslında pozitif olan verileri ne kadar doğru tespit ettiğini ölçer; bu, doğru pozitiflerin (TP) yanlış negatifler (FN, False Negatives) ile birlikte toplam pozitif örnekler içindeki oranı olarak hesaplanır. F1 skoru (F1 score) ise kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve bu iki metriğin dengesini sağlayarak modelin genel performansını özetlemektedir.

3.1.1 Makine öğrenmesi modellerinin deneysel sonuçları

Karşılaştırmalı performans değerlendirmeleri sırasıyla makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinin performansları üzerinden verilmiştir. **Tablo 4**'de DVS modeline ait 5-Katlı Çapraz Doğrulama (5-Fold Cross Validation) sonuçları verilmektedir. Buna göre DVS modelinin 5-katlı çapraz doğruluk oranı ortalaması 0.82 olarak hesaplanmıştır. **Şekil 2**'te görüldüğü üzere, DVS modeli için eğitim ve çapraz doğrulama skorları karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. DVS 5-Katlı çapraz doğrulama sonuçları

K-Kat	Doğruluk
1	0.869458
2	0.800492
3	0.827586
4	0.804938
5	0.797530



Şekil 2. DVS'ye ait öğrenme eğrileri

DVS modelinde eğitim skoru başlangıçta oldukça yüksek (0.9'un üzerinde) başlamış ve eğitim örnekleri arttıkça bu yüksek seviyede kalmıştır. Bu durum, modelin eğitim verisi üzerinde aşırı öğrenme gösterdiğini ve modele verilen yeni veriyle eğitim performansının dengelenmediğini işaret eder. Çapraz doğrulama skoru ise eğitim skoru ile karşılaştırıldığında başlangıçta düşük kalmış ve eğitim örneklerinin sayısı arttıkça yavaş bir şekilde yükselmiştir.

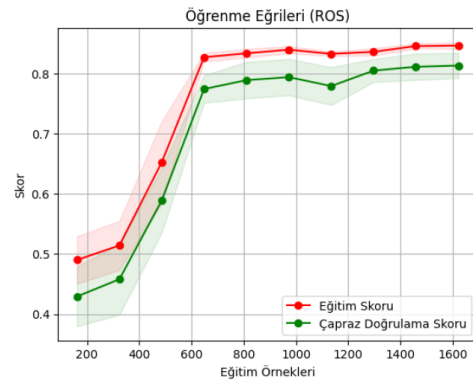
Ancak eğitim skoru ile arasında belirgin bir fark kalmış, bu da modelin eğitim verisine fazla uyum sağladığını ve test verisinde daha düşük performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Tablo 5. DVS mimarisine ait hakaret, tehdit ve nötr anlam içeren sınıfların performans karşılaştırmaları

Sınıflar/Metrikler	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru
Hakaret	0.93	0.66	0.78
Nötr	0.68	0.89	0.77
Tehdit	0.89	0.87	0.88

Tablo 5'te, DVS modeli ile hakaret, tehdit ve nötr anlam içeren sınıfların performans karşılaştırmaları yapılmıştır. **Kesinlik** (precision), **duyarlılık** (recall) ve **F1 skoru** metrikleri her sınıf için değerlendirilmiştir. Hakaret sınıfında kesinlik değeri oldukça yüksek (0.93) olmasına rağmen, duyarlılık değeri (0.66) görece daha düşüktür, bu da modelin hakaret içeren örnekleri doğru tanımlama oranının nispeten sınırlı olduğunu göstermektedir. Buna karşın, nötr sınıfta duyarlılık değeri yüksek (0.89) olmasına rağmen kesinlik (0.68) biraz daha düşüktür. Tehdit sınıfında ise hem kesinlik (0.89) hem de duyarlılık (0.87) dengeli olup, F1 skoru da 0.81 ile oldukça iyi bir performans göstermektedir. Genel olarak, DVS modelinin tehdit sınıfında daha dengeli ve tutarlı bir performans sergilediği görülmüştür.

Şekil 3'te, ROS modeline ait öğrenme eğrileri sunulmuştur. ROS modelinde eğitim skoru, eğitim örnekleri sayısı arttıkça hızla artmış ve yaklaşık 600 örnekten sonra 0.85 civarına ulaşarak sabitlenmiştir. Bu durum, modelin eğitim verisine aşırı uyum göstermeden yüksek bir performans seviyesine ulaştığını gösterir. Çapraz doğrulama skoru ise başlangıçta düşük başlamış olmasına rağmen, eğitim örnekleri arttıkça hızlı bir şekilde yükselmiş ve yaklaşık 0.8 seviyesine ulaşmıştır. Eğitim skoru ile çapraz doğrulama skoru arasındaki fark, DVS modeline kıyasla çok daha küçüktür. Bu da ROS modelinin genelleme kapasitesinin daha iyi olduğunu ve aşırı uyum göstermeden test verisi üzerinde başarılı bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. **Tablo 6**, ROS modeline ait hakaret, tehdit ve nötr anlam içeren sınıfların performanslarını raporlamaktadır.

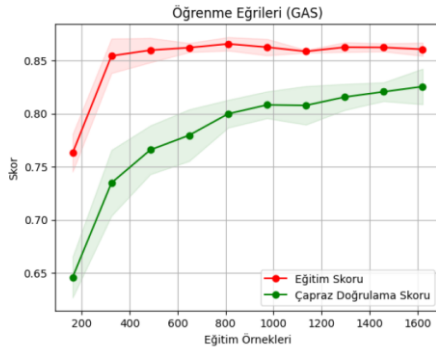


Şekil 3. ROS'a ait öğrenme eğrileri

Tablo 6. ROS mimarisine ait hakaret, tehdit ve nötr anlam içeren sınıfların performans karşılaştırmaları

Sınıflar/Metrikler	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru
Hakaret	0.87	0.74	0.80
Nötr	0.71	0.84	0.77
Tehdit	0.86	0.84	0.85

Şekil 4'te, GAS modelinin öğrenme eğrileri görülmektedir. Eğitim skoru, diğer modellerde olduğu gibi hızlı bir yükseliş göstermiş ve yaklaşık 400 örnekten sonra 0.85 seviyesine ulaşarak sabit kalmıştır. Eğitim örneklerinin artmasıyla birlikte GAS modelinin performansında büyük bir değişiklik olmamıştır. Bu GAS modelinin eğitim verisi üzerindeki performansının dengelendiğini göstermektedir. Çapraz doğrulama skoru, başlangıçta düşük olmasına rağmen eğitim örnekleri arttıkça düzenli bir şekilde yükselmiş ve yaklaşık 0.8 seviyesine ulaşmıştır. GAS modelinin çapraz doğrulama skoru ile eğitim skoru arasındaki farkın küçük olması, modelin genelleme yeteneğinin güçlü olduğunu ve aşırı uyum göstermediğini ortaya koymaktadır. Tablo 7 GAS modeline ait hakaret, tehdit ve nötr anlam içeren sınıfların performanslarını raporlamaktadır.



Şekil 4. GAS'a ait öğrenme eğrileri

Tablo 7. GAS mimarisine ait hakaret, tehdit ve nötr anlam içeren sınıfların performans karşılaştırmaları

Sınıflar/Metrikler	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skoru
Hakaret	0.92	0.72	0.81
Nötr	0.71	0.86	0.78
Tehdit	0.88	0.87	0.87

Tablo 8'de sunulan performans karşılaştırmalarına göre, makine öğrenmesi modelleri doğruluk metriği üzerinden değerlendirildiğinde farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. DVS eğitim seti üzerinde en yüksek doğruluk oranını (0.8920) elde etmesine karşın, test setindeki doğruluğu 0.8087'ye düşerek modelin aşırı uyum (overfitting) eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. ROS ise daha dengeli bir performans sergileyerek eğitim setinde 0.8402, test setinde ise 0.8028 doğruluk oranına ulaşmış, 5-katlı çapraz doğrulama ortalaması ise 0.8111 olmuştur. Bu da ROS modelinin genelleme yeteneğinin kabul edilebilir seviyelerde olduğunu göstermektedir. GAS modeli ise hem eğitim setinde (0.8555), hem test setinde (0.8185) hem de 5-katlı çapraz doğrulama ortalamasında (0.8249) en yüksek

sonuçları elde ederek, genelleme kapasitesi açısından en iyi performansı sergilemiştir. Bu sonuçlar, GAS modelinin genel performans açısından diğer modellere kıyasla daha güçlü ve tutarlı olduğunu ortaya koyarken, ROS modeli dengeli bir performans sunmakta, DVS modeli ise aşırı uyum göstererek genelleme yeteneğinde sınırlamalara sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 8. Makine öğrenmesi yöntemlerinin doğruluk metriği üzerinden performans karşılaştırmaları

	Destek Vektör	Rastgele Orman	Gradyan Artırma
Eğitim Seti	0.8920	0.8402	0.8555
Test Seti	0.8087	0.8028	0.8185
5-Katlı Çapraz Doğrulama Ort.	0.8200	0.8111	0.8249

3.1.2 Derin öğrenme modellerinin performans sonuçları

LSTM ve BERT modellerinin genelleme yeteneğini artırmak ve aşırı uyum (overfitting) riskini önlemek amacıyla devir sayısı (epoch) 4 ile sınırlandırılmıştır. Tablo 9 ve Tablo 10'da sunulan LSTM modeline ait sonuçlar, modelin her devirde (epoch) gösterdiği performansı doğruluk, F1 skoru, kesinlik ve duyarlılık metrikleri üzerinden değerlendirmektedir. Tablo 9'da, LSTM modelinin eğitim ve doğrulama kayıpları her devirde düzenli olarak azalmıştır; ilk devirde 1.0931 olan eğitim kaybı, dördüncü devirde 0.4020'ye düşerken, doğrulama kaybı da benzer şekilde 1.0800'den 0.4596'ya gerilemiştir. Buna paralel olarak, doğruluk oranı ilk devirde 0.3915 gibi düşük bir seviyede başlarken, dördüncü devirde 0.8649 gibi oldukça yüksek bir seviyeye ulaşmıştır. Tablo 10'da ise LSTM modelinin F1 skoru, kesinlik ve duyarlılık metrikleri incelendiğinde, modelin her üç metrikte de gelişim gösterdiği görülmektedir. İlk devirde F1 skoru 0.5449 iken, dördüncü devirde 0.8298'e yükselmiştir. Kesinlik ve duyarlılık değerleri de sırasıyla 0.6786 ve 0.5542 seviyelerinden başlayarak, dördüncü devirde 0.8414 ve 0.8284 seviyelerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, LSTM modelinin her devirde eğitim verisinden daha fazla öğrenme sağladığını, doğruluk, kesinlik ve duyarlılık açısından performansını önemli ölçüde artırdığını ve modelin genel genelleme yeteneğinin her aşamada iyileştiğini göstermektedir.

Tablo 9. LSTM modelinin doğruluk (isabet) metriği üzerinden performans karşılaştırmaları

Devir	Eğitim Kaybı	Doğrulama Kaybı	Doğruluk (İsabet) Oranı
1	1.093174	1.080025	0.391519
2	1.019725	0.914952	0.564103
3	0.707954	0.647656	0.731262
4	0.402070	0.459576	0.864892

Tablo 10. LSTM modelinin F1 skoru, kesinlik ve duyarlılık metriği üzerinden performans karşılaştırmaları

Devir	F1 Skoru	Kesinlik	Duyarlılık
1	0.544923	0.678634	0.554241
2	0.644545	0.696252	0.637081
3	0.739120	0.792398	0.743590
4	0.829840	0.841367	0.828402

Tablo 11 ve Tablo 12’de sunulan BERT modeli sonuçlarına göre, modelin her devirde eğitim ve doğrulama kayıpları düzenli olarak azalmış ve doğruluk oranı ilk devirde 0.8225 iken üçüncü devirde 0.9211’e yükselmiştir. Benzer şekilde, F1 skoru, kesinlik ve duyarlılık metrikleri de her devirde iyileşme göstermiştir. İlk devirde 0.8221 olan F1 skoru, üçüncü devirde 0.9209’a ulaşmıştır. Kesinlik ve duyarlılık da sırasıyla 0.8385 ve 0.8225’ten üçüncü devirde 0.9245 ve 0.9211’e yükselmiştir. Bu sonuçlar, BERT modelinin her aşamada daha yüksek doğruluk ve genelleme kapasitesine ulaştığını göstermektedir.

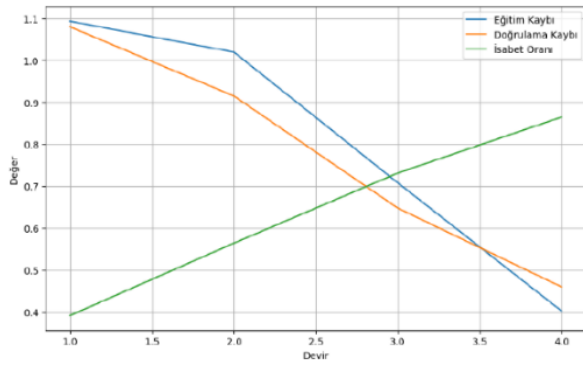
Tablo 11. BERT modelinin doğruluk (isabet) metriği üzerinden performans karşılaştırmaları

Devir	Eğitim Kaybı	Doğrulama Kaybı	Doğruluk (İsabet) Oranı
1	1.093174	0.542680	0.822485
2	0.463300	0.287721	0.887574
3	0.256500	0.277191	0.921105

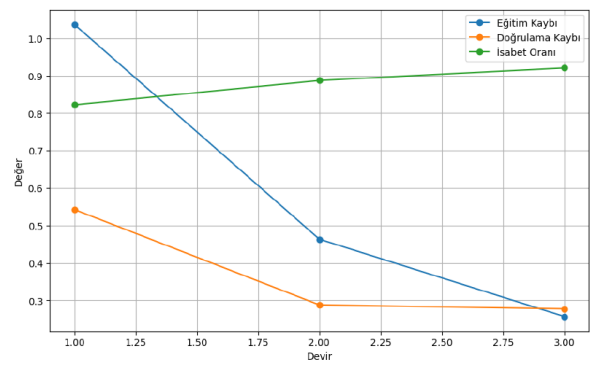
Tablo 12. BERT modelinin F1 skoru, kesinlik ve duyarlılık metriği üzerinden performans karşılaştırmaları

Devir	F1 Skoru	Kesinlik	Duyarlılık
1	0.822120	0.838480	0.822485
2	0.887493	0.888696	0.887574
3	0.920852	0.924501	0.921105

Şekil 5’te sunulan LSTM (a) ve BERT (b) modellerine ait eğitim kaybı, doğrulama kaybı ve doğruluk (isabet) oranı grafiklerine göre iki modelin performansı karşılaştırılmaktadır. Buna göre, her iki model de eğitim ve doğrulama kayıplarını düzenli olarak azaltarak doğruluk oranını artırmıştır. Ancak, BERT modeli daha hızlı öğrenme sağlamış ve daha düşük eğitim ve doğrulama kaybı ile üçüncü devirde LSTM modelinin dördüncü devrine kıyasla daha yüksek bir doğruluk oranına (0.9211) ulaşmıştır. Bu sonuçlar, BERT modelinin daha hızlı yakınsama sağladığını ve LSTM modeline kıyasla daha kısa sürede daha yüksek doğruluk elde ettiğini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 5. LSTM (a) ve BERT (b) modellerinin eğitim kaybı, doğrulama kaybı ve isabet (doğruluk) oranı.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkçe sosyal medya verileri üzerinde tehdit ve hakaret içeriklerinin tespiti amacıyla derin öğrenme ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar karşılaştırılmıştır. LSTM ve BERT gibi derin öğrenme modelleri ile DVS, RO ve GAS gibi makine öğrenmesi modelleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, BERT modelinin diğer modellere kıyasla daha yüksek doğruluk ve genelleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle BERT modeli, karmaşık dil yapılarının anlaşılmasında ve tehdit içeriklerinin başarılı bir şekilde tespit edilmesinde üstün performans sergilemiştir.

Şimdiye kadar, Türkçe için yapılan çalışmalar büyük ölçüde nefret söylemi ve taciz içeriklerinin tespitine odaklanmıştır. Ancak, tehdit ve hakaret içeriklerinin tespiti bu alanda yeterince ele alınmamıştır. Çalışmamız, bu eksikliği gidermek amacıyla, tehdit ve hakaret içerikli metinlerin otomatik sınıflandırılması için bir altyapı sunmayı hedeflemiştir. Bu tür içeriklerin doğru bir şekilde sınıflandırılması, bireylerin ve toplulukların haklarının korunması için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, sosyal medya platformlarında suç teşkil eden içeriklerin hızlı tespiti, hukuki süreçlere destek sağlayacak ve hukuk sisteminin işleyişini kolaylaştıracaktır.

Gelecek çalışmalar için, tehdit ve hakaret içerikli mesajların tüzel kişilere yönelik olup olmadığını belirleyecek mekanizmaların geliştirilmesi önerilmektedir. Bunun yanı sıra, daha büyük ve dengeli veri setleriyle yapılacak deneyler, model performansını daha da artırabilir. Varlık İsmi Tanıma (NER) gibi yöntemlerin modellerle entegre edilmesi, hukuki metinlerin daha güvenilir bir şekilde sınıflandırılmasına katkı sunacaktır. Ayrıca, veri setinin genişletilmesi ve çeşitlendirilmesiyle birlikte, modelin dil işleme kapasitesi güçlendirilecektir.

Gelecekte, bu alandaki çalışmaların daha geniş alanlara yayılması ve farklı dil modelleriyle geliştirilmesi, yapay zekanın hukuk uygulamalarında yaygın kullanımına katkı sunacaktır. Yapay zeka destekli sistemlerin, dijital ortamdaki suç unsurlarını hızlı ve doğru şekilde tespit etmesi, hukuk sisteminin işleyişine önemli faydalar sağlayacak ve toplum düzeninin korunmasında etkili olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar, araştırmanın yürütülmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yayınlanma sürecinde herhangi bir çıkar çatışması olmadığını ve bu çalışmadan maddi veya kişisel bir kazanç elde edilmediğini beyan eder.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] İ. Mayda, B. Diri ve T. Yıldız. Türkçe tweetler üzerinde makine öğrenmesi ile nefret söylemi tespiti. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi* (24), 328-334. <https://doi.org/10.31590/ejosat.903854>
- [2] Türkiye Cumhuriyeti, 5237 sayılı Türk Ceza Kanunu. Resmî Gazete, 12 Ekim 2004, sayı 25611.
- [3] A. Bozyiğit, S. Utku, and E. Nasiboğlu. Cyberbullying detection by using artificial neural network models. 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), 2019. <https://doi.org/10.1109/UBMK.2019.8907118>
- [4] H. Karayigit, C. Aci, and A. Akdagli. Detecting abusive instagram comments in Turkish using convolutional neural network and machine learning methods. *Expert Systems with Applications*, 114802, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2021.114802>
- [5] S. Küçük, and İ. Şahin. Facebook zorbalığı ve mağduriyeti ölçeklerinin Türkçeye uyarlanması, *Eğitim ve Bilim Dergisi*, vol. 40, no. 178, pp. 1-15, 2015.
- [6] O. Kaynar, B. A. Erdoğan, and M. Kaya. Makine öğrenmesi ve öznitelik seçim yöntemleriyle saldırı tespiti, *Bilgisayar Mühendisliği ve Bilimleri Dergisi*, 11 (2), 56-68, 2018.
- [7] F. Beyhan, B. Çarık, İ. Arın, A. Terzioğlu, B. Yanikoglu ve R. Yeniterzi. A Turkish hate speech dataset and detection system. In *Proceedings of the Thirteenth Language Resources and Evaluation Conference*, pages 4177–4185, Marseille, France. European Language Resources Association, 2022.
- [8] A. Najafi ve O. Varol. Turkish hate speech detection online with TurkishBERTweet. In *Proceedings of the 7th Workshop on Challenges and Applications of Automated Extraction of Socio-political Events from Text (CASE 2024)*, pages 185–189, St. Julians, Malta. ACL, 2024.
- [9] S. Dehghan ve B. Yanikoglu. Evaluating ChatGPT's ability to detect hate speech in Turkish tweets. In *Proceedings of the 7th Workshop on Challenges and Applications of Automated Extraction of Socio-political Events from Text (CASE 2024)*, pages 54–59, St. Julians, Malta, ACL, 2024.
- [10] Ş. Bayrak, A. Karaca, F. Toson, A. Kocabey ve F. B. Arslanoglu. Detection of hate speech in Turkish social media posts with BERT-Base model. 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 1-4, Istanbul, Türkiye, 2023.
- [11] Z. M. Husunbeyi, D. Akar ve A. Ozgur. Identifying hate speech using neural networks and discourse analysis techniques. In *Proceedings of the First Workshop on Language Technologies and Resources for a Fair, Inclusive, and Safe Society within the 13th Language Resources and Evaluation Conference*, pp. 32–41, Marseille, France. European Language Resources Association, 2022.
- [12] S. Özar. Türk hukukunda nefret suçlarına Avrupa güvenlik ve iş birliği teşkilatı taahhütleri çerçevesinde genel bir bakış. TAAD, (1009196), 2021. <https://doi.org/10.54049/taad.1009196>
- [13] Ç. Çöltekin, Ç. A Corpus of Turkish offensive language on social media. *Proceedings of the 12th Language Resources and Evaluation Conference (LREC)*, 2020.
- [14] Kemik Doğal Dil İşleme Grubu Veri Kümeleri. http://www.kemik.yildiz.edu.tr/veri_kumelerimiz.html, Erişildi 11 Eylül 2024.
- [15] A. Akın, zemberek-nlp. <https://github.com/ahmetaa/zemberek-nlp>, Erişildi 11 Eylül 2024.
- [16] C. Cortes, V. Vapnik. Support-vector networks. *Machine Learning*, pp. 273–297, 1995 <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- [17] J. Yang, A.J. Awan, & G. Vall-Ilosera. Support vector machines on noisy intermediate-scale quantum computers. 2019, *ArXiv, abs/1909.11988*.
- [18] L. Breiman. Random Forests. *Machine Learning*. 45. 5-32, 2001.
- [19] T. Zhang. Improving convection trigger functions in deep convective parameterisation schemes using machine learning, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 13, no. 5, 2021.
- [20] F. Jerome. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*. 29, 2000. [10.1214/aos/1013203451](https://doi.org/10.1214/aos/1013203451).
- [21] S. Hochreiter and J. Schmidhuber. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), pp. 1735-1780, 1997.
- [22] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *Proceedings of NAACL-HLT*, 2019.





Comparison of machine learning methods for limited predictive maintenance

Kısıtlı kestirimci bakım için makine öğrenmesi yöntemlerinin kıyası

Timur Özkul¹ , Ayça Topallı^{2,*} 

^{1,2} İzmir University of Economics, Electrical and Electronics Engineering Department, 35330, Balçova, İzmir, Türkiye

Abstract

Predictive maintenance has gained increasing attention recently with the availability of sensors and connectivity of equipment. Yet, it would be difficult to obtain a wide range of data, especially with legacy devices. This paper describes an intelligent method for predicting a near future condition using the past information for an environment in which data are limited to the alarm logs from industrial machinery. Since machine learning methods are proven to be efficient in classification tasks using time series data, three of them are selected to predict an alarm two hours in advance using the past occurrences. These methods are neural networks, random forests, and extreme gradient boosting. The performances of these three methods are compared, and it is aimed to find the optimal configuration among hyper-parameter values. According to the obtained results, extreme gradient boosting gives the highest F_1 -score of 0.767 with number of trees equal to 500, maximum depth of 128, and an input window of alarm occurrences from the last day. This work consists of a comparative study aiming to identify the best machine learning method for alarm predictions, which potentially provides important insights into the operation and maintenance of machinery, bringing the possibility of considerable cost reductions.

Keywords: Machine learning, Neural networks, Predictive maintenance, Random forest, Extreme gradient boosting

1 Introduction

Even a decade ago, time-based maintenance, which relies on scheduled maintenance and repairs, was dominant and the idea of Predictive Maintenance (PdM) was newly emerging. For example, bath-tub curve estimation was used for many years for machinery maintenance and replacement planning; but in fact, it is based not on any scientific concepts or engineering principles, but only intuitive and empirical knowledge [1]. The traditional maintenance strategies were time-consuming, costly and caused unplanned downtime due to unexpected breakdowns. Moreover, they are becoming increasingly outdated and less functional due to the growing safety and reliability requirements [2].

PdM technologies on the other hand, can reduce cost and downtime, prevent faults, and optimize maintenance policy. Using intelligent sensors, systems can be reliably monitored in real-time, and maintenance activities can be planned

Özet

Kestirimci bakım, duyaçların varlığı ve teçhizatların bağlanabilirliği ile son zamanlarda artan bir ilgi elde etmiştir. Yine de, özellikle eski cihazlardan geniş çapta veri elde etmek zor olabilir. Bu makale, verilerin endüstriyel bir düzenden alınan alarm kayıtları ile sınırlı olduğu bir ortam için, geçmiş bilgileri kullanarak yakın gelecekteki bir durumu öngören akıllı bir yöntemi tanımlamaktadır. Makine öğrenmesi yöntemlerinin zaman dizisi verileri kullanarak sınıflandırma yapma işlerinde etkili olduğu kanıtlanmış olduğundan, sinir ağları, rassal orman ve aşırı eğim artırma olarak seçilen üç yöntem, bir alarmin ve aynı makinenin kaydettiği diğer alarmların geçmiş oluşumlarından, o alarmı iki saat önceden tahmin etmek üzere eğitilmiştir. Bu üç yöntemin performansları kıyaslanmış ve hiper-parametre değerleri arasından en iyi yapılandırmayı bulmak hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, aşırı eğim artırma, 500 ağaç sayısı, 128 azami derinlik ve son günden alarm oluşumları girdi penceresi ile 0.767 olan en yüksek F_1 puanını vermektedir. Bu çalışma, makinelerin işlemesi ve bakımı hakkında potansiyel olarak önemli anlayışlar sağlayan ve dikkate değer masraf azaltma imkânları sunan alarm öngörülerini için en iyi makine öğrenmesi yöntemini belirlemeyi hedefleyen kıyaslamalı bir araştırmadan oluşmaktadır.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi, Sinir ağları, Kestirimci bakım, Rassal orman, Aşırı eğim artırma

effectively. Therefore PdM, which involves predicting the next failure so that preventive measures can be applied in advance, has been receiving increasing attention in the academy and in the industry over the last decade. In this Industrial Internet of Things (IIoT) era, especially with the COVID-19 breakout, PdM is of increasing importance [3].

Industry 4.0 permits different kinds of devices from diverse departments of plants to log various measurements. Hence, big data analytics plays a vital role. Processing and then analysing these data provide important knowledge and information for administrative decisions, such as machine fault prevention, spare parts inventory reduction, improvement in operator safety, etc. [4].

Global challenges and very competitive markets create pressure to deliver better solutions. Players can be successful in such a realm only by developing AI driven tools, and using data-oriented decision making algorithms [5]. Machine

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ayca.topalli@ieu.edu.tr (A. Topallı)

Geliş / Received: 04.04.2024 Kabul / Accepted: 17.11.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1465282

Learning (ML) is a powerful method that is able to process multi-dimensional data, and to identify intricate relationships existing within data [6]. With a properly chosen ML method, an effective system can be designed to detect failures, raise alarms, and warn the authorized personnel in industrial environments.

There are, however, some issues with the PdM, such as the difficulty of connecting sensors to legacy machinery, or remotely accessing sensor measurements. In such cases, the existing alarm logs raised by legacy systems can be utilized, since they still carry valuable and reliable information. In this context, analysing the alarm logs may support limited PdM environments in many domains [7]. By predicting the alarms by ML in advance, corrective actions can be taken and potential faults can be prevented [8], [9].

There has been an increasing interest in the PdM and alarm prediction in recent years, some of these studies can be found in [10], [11], [12]. There are also comprehensive literature reviews on this subject, for example, Carvalho et al. review ML based PdM literature systematically with their compatibility and performance results [4]. Baptista et al. report about the risk of failure prediction, in which artificial intelligence approaches outperform statistical approaches [13]. Similarly, Bousdekis et al. give a literature review on dynamic decision making for PdM, covering the period between 2013 and 2018 and focuses on maintenance planning and scheduling, optimization, and reliability and degradation-based decision making [14]. Their review reveals an increasing preference for automated and real-time decision making algorithms.

Neural Networks (NNs) are frequently applied in many industrial areas, such as predictive control [15] and soft sensing [16]. For a multi-label classification task to forecast rare alarms generated by dairy product packing machines, Pezze et al. propose a deep learning-based approach with Recurrent Neural Networks (RNNs) and transformers, a popular natural language processing architecture [17]. Their environment allows them to use only past alarm logs for the prediction of any alarm occurrence. They utilize the same dataset [18], also used in this study.

Kolokas et al. give a comparison of NNs with some other ML approaches used for fault detection in an industrial device using sensor data [19]. Biswal and Sabareesh collect wind turbine vibration data and use NNs to classify the state characteristics as healthy or defective [20]. Their results show 92.6% accuracy. Zhu et al. predict probabilities of alarm occurrences, given the previous alarms based on an N-gram model [21].

There are also studies in the literature on PdM with Random Forest (RF) modelling. Prytz et al. propose the use of RF to predict repairs in the automotive sector for numerous vehicle parts [22]. Kulkarni et al. use an RF model to detect faults in cooling and cold storage systems with an 89% accuracy [23]. Santos et al. detect faults in squirrel-cage induction motors, such as winding short circuits with RF [24]. Paolanti et al. introduce an RF algorithm to classify states of the industrial machinery using various sensor data [25]. Su and Huang develop a system in their research to

detect hard disk drive faults in real-time using RF models trained with historical data [26].

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) is also attracting more attention in this area. The aim of the study presented by Ayvaz and Alpay is to predict possible production line faults realistically before occurrence [5]. The authors explore multiple ML methods and compare these using a real-world dataset of motion, speed, weight, temperature, electrical current, vacuum, and air pressure sensor readings from a range of equipment. Their evaluation results indicate that the PdM successfully identifies the indicators of possible faults and prevents halts in production. In their tests, RF and XGBoost appear to outperform other algorithms. They integrated the best performing ML model into the production system in a personal care goods factory.

Steurtegen and Poel implement an XGBoost model to predict and diagnose machinery breakdowns [27]. The model is trained with sensor and manual report data, and enriched with Shapley values [28]. The aim was to prove that statistical methods and appropriate data handling improve the significance of ML in the diagnostic aspect.

In this study, where only the alarm logs are available from an industrial premise, the occurrence of an alarm is predicted two hours in advance, using the past occurrence information of that alarm, and others. In order to do so, three different ML approaches are considered: NNs, RFs, and XGBoost. To find the best method and best configuration for this task, several models are constructed and trained with different hyper-parameters, and results are compared.

To the best of authors' knowledge, there is no study similar to the one presented here that compares different ML techniques for alarm prediction. There is only one other work [17] done with the same dataset [18]; but in that work, very rarely occurred alarms are predicted in eight hours output window. This means that both selected alarms and the time frame are different there. Therefore, it is not possible to compare it directly with this study. For a general comparison of the previous studies, Table 1 is prepared.

Table 1. Summary of the similar studies

Work	Task	Method	Data Source
[5]	Production line faults prediction	RF, XGBoost	Sensors
[13]	Fault event prediction	ARMA	Historical data
[15]	Predictive control for parking	NN	Sensors
[17]	Rare alarms prediction	RNN	Alarms
[19]	Fault detection	NN	Sensors
[20]	Wind turbine defect detection	NN	Sensors
[21]	Alarm prediction	N-gram	Alarms
[22]	Automotive parts repair prediction	RF	Sensors
[23]	Cooling and cold storage systems fault detection	RF	Sensors
[24]	Squirrel-cage induction motors fault detection	RF	Sensors
[25]	Industrial machinery state classification	RF	Sensors
[26]	Hard disk drive fault detection	RF	Historical data
[27]	Machinery breakdown prediction and diagnose	XGBoost	Sensors
This work	Alarm prediction	NN, RF, XGBoost	Alarms

The format of the rest of the paper is as follows. Section 2 introduces the methodology proposed in this study. Results and discussions are given in Section 3. Conclusions are included in Section 4. The article should include main titles such as Abstract, Introduction, Material and methods, Results and discussion, Conclusions and References.

2 Material and methods

The aim of this current work is to use several different ML methods to predict whether a specific alarm of a specific machine would occur in the following two hours using only information on the past alarm occurrences. The most common ML algorithm in the literature conducted between 2009 and 2018 is Random Forest (RF), followed by Neural Network (NN) based methods, Support Vector Machines (SVM), and k-means [4]. Therefore in this study, NNs, RFs, and XGBoost are selected as three different ML methods. Then the results are compared to find the most appropriate method and structure.

In this section, the data analysis method and these three ML methods are explained.

2.1 Data analysis

The dataset used in this work is publicly available and can be obtained via IEEE Dataport [17]. It consists of a time series of alarms recorded by a packaging equipment in an industrial location. The original raw data shown in Table 2 has three columns: the timestamp of the alarm occurrence, the alarm number, and the ID number of the machine that the alarm occurs. These data come from 20 separate machines from different plants. Alarms, logged by these machines during 16 months between 21 February 2019 10:16 and 17 June 2020 03:53, are of 154 distinct types. A total of 444.834 unique data with a highly unbalanced distribution are recorded.

Table 2. The original raw data

Timestamp	Alarm	Machine
21.02.2019 10:16	139	3
21.02.2019 10:18	139	3
...
17.06.2020 03:53	138	0

Table 3 gives the IDs of five machines with the most alarm occurrences. It is seen that the machine with ID number 6 has the greatest alarm log; therefore, it was selected for further analysis, as a larger amount of data brings more richness in terms of quality and accuracy. As seen in Table 3, there are 59,357 alarms recorded for Machine 6 that are used as data points during machine learning.

Table 3. Top five machines with the most alarm occurrences

Machine	Number of Alarms
6	59.357
7	50.568
10	49.670
3	42.387
13	37.022

Furthermore, the five alarms most frequently logged by Machine 6 are alarms 98, 26, 11, 137, and 29, as shown in Figure 1. Out of 154 distinct alarms, 69 occurred in Machine 6 during the period considered. One alarm every ten minutes, on average, is logged by Machine 6.

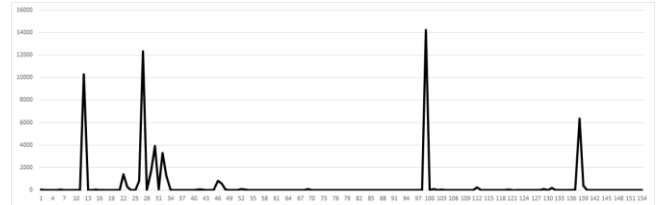


Figure 1. Distribution of alarms logged by machine 6

For each of these five alarms, the percentages of the occurrences for the next two hours for each hour of the day are calculated, i.e., whether or not that alarm will occur at least once during the following two hours for any given time. The same operation is repeated for four and eight hours, and the results are shown in Table 4.

It is seen in Table 4 that Alarm 98 was activated 49.37% of the time in the following two hours. This means that it occurs during the next two hours in almost one half of the time; but not in the other half. This is a behaviour very close to an even distribution. For the following four and eight hours, however, this balance is lost. When the duration increases, the probability of the alarm occurring also increases. This phenomenon is also true for the other alarms in Table 4. It is well known that when the data distribution is imbalanced, ML classification performance tends to show bias towards the bigger class, and during the ML phase, it is important to use a balanced data from each case of the output class. Therefore, the selected dataset used in this work is Alarm 98 of Machine 6 with the following two-hours as the prediction interval.

Table 4. Top five alarm occurrences for the next two, four, and eight hours for machine 6

Alarm	Next 2-hour	Next 4-hour	Next 8-hour
98	49.37%	67.06%	82.93%
26	32.92%	47.17%	64.70%
11	49.04%	67.26%	83.48%
137	41.41%	58.83%	77.04%
29	16.60%	26.89%	42.15%

2.2 Machine learning models

In the field of PdM, the most preferred ML models are NN, RF, and XGBoost; therefore, these models are also selected for application to the alarm log dataset in this work. For all these ML models, the dimension of the input vector is 69, since Machine 6 logged 69 different alarms out of a total of 154 in the current dataset. However, it is not possible to precisely know the optimum window length of the past alarm occurrences as the model's input. Since it is a hyper-parameter, three different lengths for past windows are considered: one day, one week, and one month. During these

intervals, the number of occurrences of each alarm are calculated and given as inputs to each model. Therefore, each input component corresponds to the number of occurrences during the past window frame of a particular alarm, which could be either zero or a positive number. Zero means that the corresponding alarm never occurred in that window. The output is fixed for all methods: the probability of the occurrence of Alarm 98 in the next two hours. A prediction greater than 50% is considered as indicating that the alarm will occur.

For the implementation and evaluations of the models, Google's Colab environment is used in conjunction with Python programming language and Keras ML libraries. The evaluation metrics used are accuracy, precision, recall, and F1-score. Accuracy is defined as the proportion of the correctly classified alarm occurrences, either as "occurrence" or "no occurrence" over the test set, as given in Equation (1), where TP is the true positives (the number of correctly classified "occurrence"), TN is the true negatives (the number of correctly classified "no occurrence"), FP is the false positives (the number of incorrectly classified "occurrence"), and FN is the false negatives (the number of incorrectly classified "no occurrence").

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

Precision, as shown in Equation (2), is the ratio of correct classifications as "occurrence" over the total number classifications as "occurrence".

$$Precision = \frac{(TP)}{(TP + FP)} \quad (2)$$

Recall (Equation (3)) is calculated as the ratio of correct classifications as "occurrence" over the total number of occurrences.

$$Recall = \frac{(TP)}{(TP + FN)} \quad (3)$$

Finally, F_1 -score is the harmonic mean of the precision and recall as given in Equation (4).

$$F_1 = 2 \times \frac{(Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)} \quad (4)$$

$$= \frac{(TP)}{TP + \frac{1}{2}(FP + FN)}$$

2.2.1 Neural networks (NN)

NNs, inspired by biological neurons, are composed of intelligent and interconnected processing units. These connections have associated weights, which are updated at each training step via gradient descent algorithm, called backpropagation [19]. Since NNs have multiple layers, as the phrase deep learning suggests, training takes place at different levels of hierarchy, allowing them to learn very

complex relations between the input and output variables. An NN structure is shown in Figure 2.

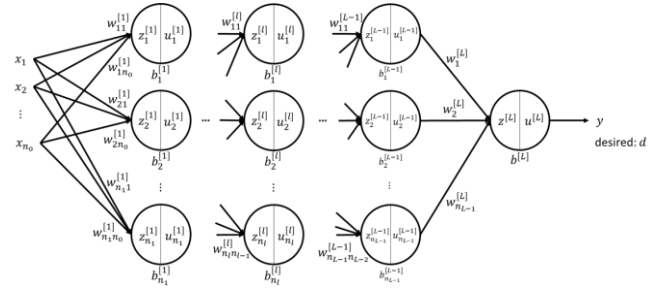


Figure 2. NN architecture

In this architecture, input variables are denoted by the vector x , the desired output or ground truth is represented by d , and the predicted value of d by the NN model is shown as y . Since alarm prediction is a binary classification problem, the model output consists of a single variable. The forward propagation equations (Equation (5) and (6)) give the neuron outputs. According to the terms used in Figure 2, the neuron output $z_i^{[l]}$ is calculated as shown in Equation (5) where $i = 1, 2, \dots, n_l$ and $l = 1, 2, \dots, L$ and l represents the layer number, w_{ij} represents weights between the i^{th} neuron and the j^{th} input u_j , b_i represents the bias associated with the i^{th} neuron, n_{l-1} represents the number of neurons in the $(l-1)^{th}$ layer, n_l represents the number of neurons in the l^{th} layer, and L represents the number of layers.

$$z_i^{[l]} = \sum_{j=1}^{n_{l-1}} w_{ij}^{[l]} \cdot u_j^{[l-1]} + b_i^{[l]} \quad (5)$$

Then this output is undergone to a nonlinear activation function as shown in Equation (6) where a can be a sigmoid, reLU, tanh, etc. In these formulas, the input variable x_j is represented as $u_j^{[0]}$, and the NN output y as $u^{[L]}$.

$$u_i^{[l]} = a^{[l]}(z_i^{[l]}) \quad (6)$$

The weight updates based on the gradient descent algorithm are calculated by backward propagation equations, as shown in Equation (7) and (8) where α is the learning rate and J is the logistic regression cost function to be minimized given in Equation (9).

$$w_{ij}^{[l]} = w_{ij}^{[l]} - \alpha \frac{\partial J}{\partial w_{ij}^{[l]}} \quad (7)$$

$$b_i^{[l]} = b_i^{[l]} - \alpha \frac{\partial J}{\partial b_i^{[l]}} \quad (8)$$

$$J = -[d \cdot \log(y) + (1 - d) \cdot \log(1 - y)] \quad (9)$$

2.2.2 Random forests (RF)

RF, originally proposed by Breiman in the 2000's, is a supervised learning algorithm [29]. It consists of a predictor ensemble of decision trees (DTs) that grow in randomly selected subspaces of data. RF combines the output of those DTs to reach a unique result [30].

DTs start with a basic question, constituting the root node, from where a series of questions make up the decision nodes. The tree acts as a means to split the data in the best way possible. Questions fitting the criteria follow the “True” branch and the others follow the alternate “False” path. The final decision arrived after answering the questions is denoted as the leaf node, as shown in Figure 3.

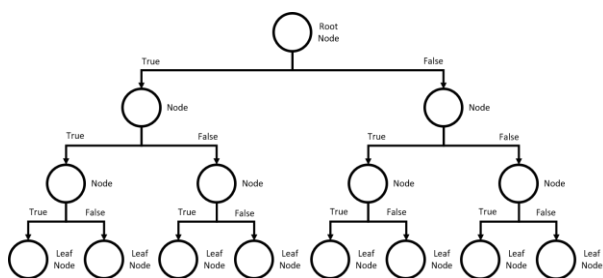


Figure 3. DT structure where RF algorithm is based on

DTs are prone to bias or overfitting. To overcome these problems in the random forest algorithm, an ensemble is formed from multiple decision to predict more accurate results, since the individual trees are uncorrelated with each other. Predictions of ensemble DTs are collected to find the most suitable result.

In the bagging (a.k.a. bootstrap aggregation) ensemble method, a data from the training set is chosen randomly and the corresponding result is found. This procedure is repeated multiple times where selection of the same data samples is allowed (selection with replacement). The majority of the results give the final estimate for the classification type tasks [29]. In this way, variance is reduced in noisy datasets.

RF algorithm creates an uncorrelated collection of DTs. It is different from DTs such a way that while DTs consider all the possible feature splits, RFs only select a subset of those features randomly. This ensures DTs used to be low correlated, yielding to less risk of overfitting. The number of trees and their depth (i.e., node levels) are the main hyperparameters.

RFs can adapt themselves to the nonlinearities existing in the data, and can make more accurate predictions than linear regression methods.

2.2.3 Extreme gradient boosting (XGBoost)

XGBoost is a modified and improved version of decision trees, optimized for speed and performance [31]. It is a scalable, sparsity-aware algorithm for data with high degrees of dimensionality and correlation [32].

Similar to RF, XGBoost also utilizes multiple DTs, however it combines them in a different way. In this approach, weak models are improved by brought together to create a collectively strong model. The boosting process is

repeated several times where each new model attempts to correct the errors of the combined ensemble of previous models.

At each boosting step, an observation weight for the next model is calculated based on the gradient of the error with respect to the prediction. Then the new model acts in the direction minimizing the prediction error, hence the name of the algorithm. XGBoost iteratively train an ensemble of DTs and the final prediction is a weighted sum of all of the tree predictions.

This iterative boosting process helps minimise the bias hence addressing the underfitting issues, whereas RF's bagging deals with the variance and overfitting. As it reduces the error in each iteration, XGBoost also prioritises the points which are harder to predict, thus improving accuracy. This process in general results in a fine-tuned model that performs well on unseen data, which also helps with overfitting, when incorporated with tuned L1 and L2 regularization hyperparameters and other techniques such as cross-validation. This sequential decision tree building sets XGBoost apart from RF since RF trains each branch independently and then aggregates the results with a chosen method. This allows XGBoost to improve accuracy by focusing on specific errors made.

As for the impact on the overall speed, XGBoost also performs efficiently. This is mainly related to its ability to decrease the overall training time by involving parallel computation when building the decision trees [33]. The overall speed and efficiency can be further improved using other hyperparameters such as shrinkage, maximum depth, tree growth limit and regularization. As mentioned before, being a sparsity-aware algorithm also impacts the speed since it allows skipping over missing or zero entries in the dataset, therefore increasing the performance.

Alongside the given hyperparameters, a substantial amount of hyperparameters exist within the scope of XGBoost, while also allowing the customization of the loss function. This allows a more flexible and optimized approach to the problem at hand, allowing access to a balanced viewpoint in terms of speed and computational complexity. When coupled with the property of XGBoost being resilient against datasets with outliers, it allows a reliable and robust solution for a variety of datasets some of which may also include impacting elements such as noise.

When compared to RF in terms of model complexity, in some cases as a consequence of RF growing trees fully it may lead to models with increased complexity whereas XGBoost can stop the tree growth by using the pruning method leading to another method of preventing overfitting. However, it must be kept in mind that false tuning XGBoost may also result in it being an unnecessarily complex model.

3 Results and discussions

All models constructed in this work were re-run multiple times and five-fold results were obtained. The averages for different configurations are calculated and given below. The data in each training are divided into training and test sets, as 90% and 10%, respectively, as the most common split used in the literature.

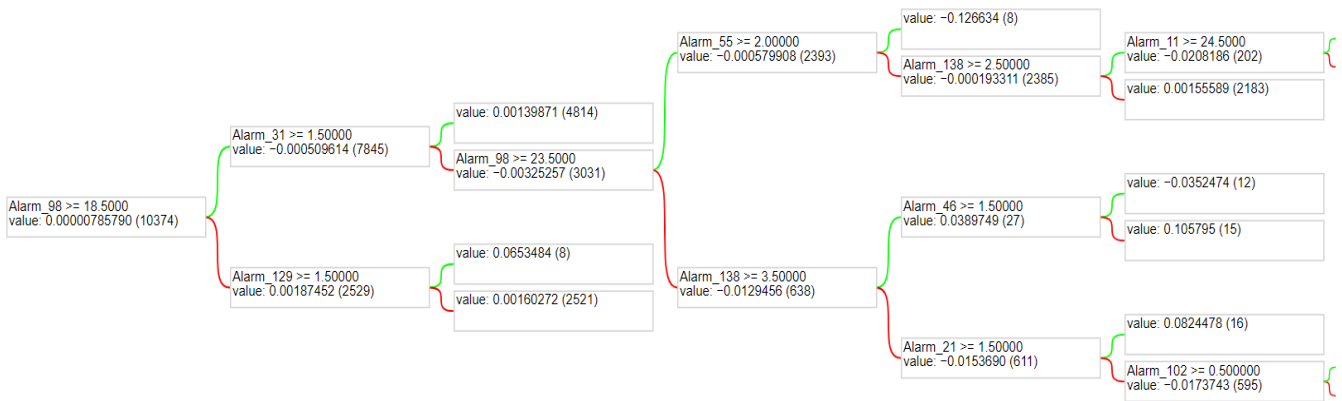


Figure 4. Initial tree of XGBoost

Results for the NN model are shown in Table 5 for three different past window openings of the inputs. The selected number of hidden layers is two with 100 neurons in each. The following are used in all networks: Adam optimizer, binary cross-entropy loss function, and 0.1 dropout. The learning rate is taken as 0.01.

Table 5. Results with NN

	Last Day	Last Week	Last Month
Average Accuracy	0.655	0.615	0.579
Average Precision	0.676	0.645	0.650
Average Recall	0.588	0.487	0.321
Average F_1 -score	0.629	0.555	0.430

According to the F_1 -scores given in Table 5, the most successful configuration is the one with the past day inputs. This means that alarms occurred earlier than one day do not have significant effect on the current alarm, but the ones logged during the last 24-hours should be taken into account.

Table 6 presents the best results for RF models for each past window scheme. Three different amounts of trees are used: 300, 500, and 1000. The maximum depth options are 32, 64, and 128.

Table 6. Results with RF

	Last Day	Last Week	Last Month
Number of Trees	500	1000	1000
Maximum Depth	64	128	128
Average Accuracy	0.762	0.746	0.708
Average Precision	0.743	0.712	0.710
Average Recall	0.768	0.759	0.754
Average F_1 -score	0.756	0.735	0.731

Although the results are close in the RF model, the F_1 -score of 0.756 shows that the best configuration for the RF case is the model with the alarm occurrence numbers during the last day as inputs, which is a consistent result with the NN case.

The same number of trees and maximum depth configurations of the RF case are used for the XGBoost models, and the results are shown in Table 7. Again, the F_1 -score of 0.767 indicates that the most effective input is the number of alarm occurrences of the last day, as compared to the last week or month. This result is also aligned with the previous NN and RF models, showing that the alarm occurrences during the last day are of the most importance.

The very first decision tree following the first five branches created for the XGBoost algorithm is given in Figure 4 for visualization purposes.

Table 8 summarizes the evaluation figures for the best models of NN, RF, and XGBoost. Among these three, XGBoost provides the greatest F_1 -score (0.767). This result is expected since it is known in the literature that XGBoost outperforms other similar methods such as NN and RF.

Table 7. Results with XGBoost

	Last Day	Last Week	Last Month
Number of Trees	500	1000	1000
Maximum Depth	64	128	128
Average Accuracy	0.769	0.770	0.752
Average Precision	0.753	0.741	0.735
Average Recall	0.781	0.789	0.758
Average F_1 -score	0.767	0.764	0.746

Table 8. Comparison between NN, RF and XGBoost

	NN	RF	XGBoost
Average Accuracy	0.655	0.762	0.769
Average Precision	0.676	0.743	0.753
Average Recall	0.588	0.768	0.781
Average F_1 -score	0.629	0.756	0.767

Accuracy graphs for a single run for each method can also be seen in Figure 5.

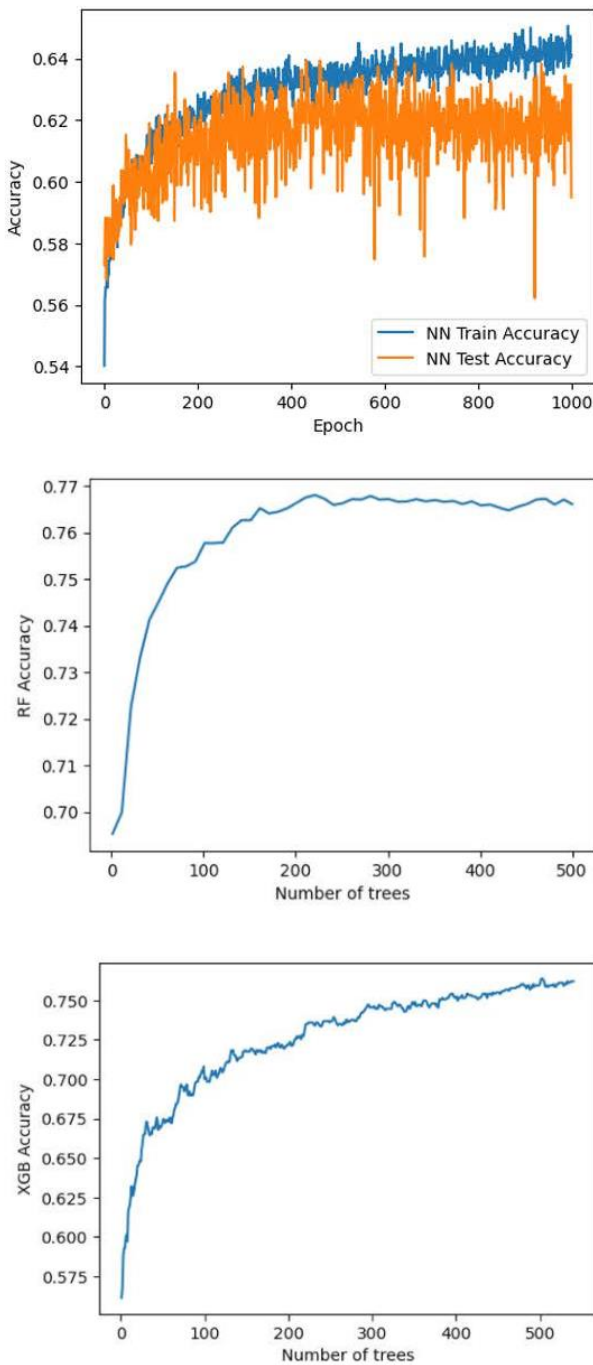


Figure 5. Accuracy logs for each model

In addition to having the greatest accuracy among the given three models, XGBoost also has the lowest runtimes, thus being the most efficient one. RF runtime ranges from 49 seconds to 96 seconds for a single case, whereas NN varies between 87 seconds to 133 seconds. On the other hand, XGBoost spans from 21 seconds to 40 seconds.

4 Conclusions

This paper presents a performance comparison among three different ML methods, namely NN, RF, and XGBoost

for a PdM related binary classification problem. The task is to predict an alarm condition from past information.

The system output is the predicted probability of an alarm occurrence, whether it will be triggered in the following two hours or not; and the inputs are the number of occurrences for each alarm during a past period. Three windows are considered for the past values: last day, last week, and last month.

The obtained training results show that the ML model using the XGBoost algorithm gives the best F_1 -score of 0.767 with number of trees equal to 500 and maximum depth of 128 for the alarm prediction task.

The study is based on a real-world dataset from a packing industry, in which distinct alarms are logged by multiple machines. Since unanticipated faults and breakdowns in industry may cause high costs, it is of great importance for companies to foresee problems in advance and to take the necessary precautions. Integrating ML algorithms with PdM yields considerable cost reduction. In this respect, ML-powered alarm prediction has a significant business value and it is important to identify and select the most suitable ML method, as proposed here.

In this study, the model depends on the alarm logs alone; hence, it can be applied to legacy equipment, to which it is impossible to apply typical PdM approaches with rich sensor measurements, and therefore, data are limited.

Rapid developments in the Industry 4.0 era make it increasingly easy to benefit from data-driven, ML-based decision systems. Future work should consider the same problem with other ML approaches such as recurrent neural networks or LSTM, as well as the three methods aforementioned, for comparison of results. This current work was conducted without the information about the importance level of the different machines and different alarms; a more meaningful machine and alarm selection could be achieved with support from a domain expert. Data distribution may change according to the alarm selected, which may lead to a different ML method being considered.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 12%

References

- [1] H.M. Hashemian and W.C. Bean, State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60, 3480–3492, 2011. <https://doi.org/10.1109/tim.2009.2036347>.
- [2] K.T.P. Nguyen and K. Medjaher, A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics, *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 251–262, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.03.018>.
- [3] I.J. Akpan, E.A.P. Udoh and B. Adebisi, Small business awareness and adoption of state-of-the-art technologies in emerging and developing markets, and lessons from the COVID-19 pandemic, *Journal of Small Business & Entrepreneurship*, 34, 123–140,

2020. <https://doi.org/10.1080/08276331.2020.1820185>.
- [4] T.P. Carvalho, F.A.A.M.N. Soares, R. Vita, R. da P. Francisco, J.P. Basto and S.G.S. Alcalá, A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance, *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>.
- [5] S. Ayvaz and K. Alpay, Predictive maintenance system for production lines in manufacturing: A machine learning approach using IoT data in real-time, *Expert Systems with Applications*, 173, 114598, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114598>.
- [6] T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens and K.-D. Thoben, Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications, *Production & Manufacturing Research*, 4, 23–45, 2016. <https://doi.org/10.1080/21693277.2016.1192517>.
- [7] W. Li, H. Li, S. Gu and T. Chen, Process fault diagnosis with model- and knowledge-based approaches: Advances and opportunities, *Control Engineering Practice*, 105, 104637, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104637>.
- [8] Y. He, C. Gu, Z. Chen and X. Han, Integrated predictive maintenance strategy for manufacturing systems by combining quality control and mission reliability analysis, *International Journal of Production Research*, 55, 5841–5862, 2017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1346843>.
- [9] W. Yu, T. Dillon, F. Mostafa, W. Rahayu and Y. Liu, A Global Manufacturing Big Data Ecosystem for Fault Detection in Predictive Maintenance, *IEEE Trans. Ind. Inf.*, 16, 183–192, 2020. <https://doi.org/10.1109/tii.2019.2915846>.
- [10] O. Güler, Turbofan motorlarının kestirimci bakımında makine öğrenimi algoritmaları performanslarının karşılaştırılması, *NOHU J. Eng. Sci.*, 13, 1, 99–106, 2024. <https://doi.org/doi:10.28948/ngumuh.1266541>.
- [11] G. Dorgo and J. Abonyi, Sequence Mining Based Alarm Suppression, *IEEE Access*, 6, 15365–15379, 2018. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2797247>.
- [12] E. Ruschel, E.A.P. Santos and E. de F.R. Loures, Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review, *Journal of Manufacturing Systems*, 45, 180–194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.09.003>.
- [13] M. Baptista, S. Sankararaman, Ivo.P. de Medeiros, C. Nascimento Jr., H. Prendinger and E.M.P. Henriques, Forecasting fault events for predictive maintenance using data-driven techniques and ARMA modeling, *Computers & Industrial Engineering*, 115, 41–53, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.033>.
- [14] A. Bousdekis, K. Lepenioti, D. Apostolou and G. Mentzas, Decision Making in Predictive Maintenance: Literature Review and Research Agenda for Industry 4.0, *IFAC-PapersOnLine*, 52, 607–612, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.226>.
- [15] J.-H. Shin, H.-B. Jun and J.-G. Kim, Dynamic control of intelligent parking guidance using neural network predictive control, *Computers & Industrial Engineering*, 120, 15–30, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.023>.
- [16] S. Gomes Soares and R. Araújo, An on-line weighted ensemble of regressor models to handle concept drifts, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 37, 392–406, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.10.003>.
- [17] D.D. Pezze, C. Masiero, D. Tosato, A. Beghi and G.A. Susto, FORMULA: A Deep Learning Approach for Rare Alarms Predictions in Industrial Equipment, *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, 19, 1491–1502, 2022. <https://doi.org/10.1109/tase.2021.3127995>.
- [18] D. Tosato, D. Dalle Pezze, C. Masiero, G.A. Susto and A. Beghi, Alarm logs of industrial packaging machines, 2020. <https://doi.org/10.21227/NFV6-K750>.
- [19] N. Kolokas, T. Vafeiadis, D. Ioannidis and D. Tzovaras, Forecasting faults of industrial equipment using machine learning classifiers, 2018 *Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, 2018. <https://doi.org/10.1109/inista.2018.8466309>.
- [20] S. Biswal and G.R. Sabareesh, Design and development of a wind turbine test rig for condition monitoring studies, 2015 *International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, 2015. <https://doi.org/10.1109/iic.2015.7150869>.
- [21] J. Zhu, C. Wang, C. Li, X. Gao and J. Zhao, Dynamic alarm prediction for critical alarms using a probabilistic model, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24, 881–885, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.04.017>.
- [22] R. Prytz, S. Nowaczyk, T. Rögnavaldsson and S. Byttner, Predicting the need for vehicle compressor repairs using maintenance records and logged vehicle data, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 139–150, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.02.009>.
- [23] K. Kulkarni, U. Devi, A. Sirighee, J. Hazra and P. Rao, Predictive Maintenance for Supermarket Refrigeration Systems Using Only Case Temperature Data, 2018 *Annual American Control Conference (ACC)*, 2018. <https://doi.org/10.23919/acc.2018.8431901>.
- [24] T. dos Santos, F.J.T.E. Ferreira, J.M. Pires and C. Damasio, Stator winding short-circuit fault diagnosis in induction motors using random forest, 2017 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017. <https://doi.org/10.1109/iemdc.2017.8002350>.
- [25] M. Paolanti, L. Romeo, A. Felicetti, A. Mancini, E. Frontoni and J. Loncarski, Machine Learning approach for Predictive Maintenance in Industry 4.0, 2018 *14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 2018. <https://doi.org/10.1109/mesa.2018.8449150>.
- [26] C.-J. Su and S.-F. Huang, Real-time big data analytics for hard disk drive predictive maintenance, *Computers & Electrical Engineering*, 71, 93–101, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.07.025>.

- [27] B. Steurtewagen and D. Van den Poel, Adding interpretability to predictive maintenance by machine learning on sensor data, *Computers & Chemical Engineering*, 152, 107381, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107381>.
- [28] L.S. Shapley, 17. A Value for n-Person Games, *Contributions to the Theory of Games (AM-28)*, Volume II, 307–318, 1953. <https://doi.org/10.1515/9781400881970-018>.
- [29] L. Breiman, *Machine Learning* 45, 5–32, 2001. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>.
- [30] C. Strobl, J. Malley and G. Tutz, An introduction to recursive partitioning: Rationale, application, and characteristics of classification and regression trees, bagging, and random forests., *Psychological Methods*, 14, 323–348, 2009. <https://doi.org/10.1037/a0016973>.
- [31] T. Chen and C. Guestrin, XGBoost, *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- [32] D. Nielsen, *Tree Boosting With XGBoost - Why Does XGBoost Win 'Every' Machine Learning Competition?* Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Mathematical Sciences, Norway, 2016.
- [33] H. Belyadi and A. Haghighat, *Supervised learning*, in *Machine Learning Guide for Oil and Gas Using Python*, Gulf Professional Publishing, 2021, pp. 169-295. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821929-4.00004-4>.





Dolgunuz ve hibrit kompozitlerin delme performansının ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of drilling performance and mechanical properties of unfilled and hybrid composites

Hüseyin Gürbüz^{1,*}, Şehmus Baday², Mehmet Emin Demir³, İbrahim Halil Akcan⁴

^{1,4} Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72060, Batman, Türkiye
^{2,3} Batman Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

Öz

Kompozit malzemelerin içerdiği dolgu ve takviye parçacıklarının özellikleri ve oranları kompozit malzemelerin çekme ve eğme gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca kompozit malzemelerin montaj ve bağlantıları için delme işlemi büyük bir önem arz etmektedir. Bu yüzden farklı işleme parametrelerde kompozit malzemelerin delinmesinde meydana gelen delaminasyonlar ve ilerleme kuvvetleri birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu çalışmanın amacı Gr ve B₄C dolgularının karbon elyaf takviyeli kompozitlere ilave ederek dolguların kompozitin mekanik özellikleri ve işlenebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmaktır. El yatırma yöntemiyle %7.5 B₄C ve %7.5 Gr dolguları kullanılarak üretilen kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Dolgu parçacıklarının kompozitin çekme dayanımını düşürdüğü, eğilme dayanımını ise arttırdığı anlaşılmıştır. Kompozit iş parçalarına 4 farklı ilerleme oranı ve kesme hızında boydan boya delik delme işlemi uygulanmıştır. Ayrıca dolgunuz ve hibrit dolgulu kompozitlerin delinmesinde ilerleme oranı ve kesme hızı gibi işleme parametrelerinin ilerleme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlerleme oranının artması delaminasyon faktörünü olumlu etkilerken, kesme hızının artması olumsuz etkilemektedir. Karbon elyaf takviyesine dolgu ilave edilmesi ise delaminasyon miktarını düşürmüş, ilerleme kuvvetlerini ise arttırmıştır.

Anahtar kelimeler: Mekanik özellikler, Delme, Delaminasyon, Karbon Elyaf, B₄C, Gr

1 Giriş

Polimer malzemelerin sahip olduğu, kimyasal direnç, hafiflik, düşük maliyet, kolay üretim, su iticilik ve kolay işlenebilirlik gibi birçok olumlu özellik, bu malzemelerin mühendislik alanında kullanımını arttırmaktadır [1, 2]. Fakat polimerlerin ısı dirençlerinin düşük olması ve mekanik dayanımlarının yeterli olmaması bu malzemeleri dezavantajlı kılmaktadır. Polimerlerin mekanik özellikleri, hem B₄C, SiO₂, Al₂O₃, Gr gibi partiküllerle, hem de jüt, keten gibi doğal ya da aramid, karbon, cam gibi sentetik elyaflarla geliştirilebilmektedir. Polimerler elyafların

Abstract

The properties and ratios of filler and reinforcement particles in composite materials affect the mechanical properties of composite materials such as tensile and flexural. In addition, the drilling process is of great importance for the assembly and connections of composite materials. Therefore, delaminations and feed forces that occur in drilling composite materials at different machining parameters have been the subject of many studies. The aim of this study is to investigate the effects of adding Gr and B₄C fillers to carbon fiber-reinforced composites on the mechanical properties and machinability of the composites. Tensile and flexural strengths of the composites, produced using hand lay-up method with 7.5% B₄C and 7.5% Gr fillers, were determined. It was found that the filler particles reduced the tensile strength of the composites but increased their flexural strength. Through-hole drilling was applied to composite workpieces at 4 different feed rates and cutting speeds. Additionally, the effects of machining parameters such as feed rate and cutting speed on thrust force and delamination factor during the drilling of both unfilled and hybrid-filled composites were examined. While an increase in feed rate positively affected the delamination factor, an increase in cutting speed had a negative impact. Moreover, the addition of fillers to carbon fiber reinforcement reduced the amount of delamination but increased the thrust forces.

Keywords: Mechanical properties, Drilling, Delamination, Carbon Fiber, B₄C, Gr

dağılmasını ve kompozite uygulanan yükün liflere aktarılmasını sağlamaktadır. Bir polimer türü olan epoksi reçineler, yüksek boyutsal kararlılıkları, kolay imal edilebilmeleri, lifleri iyi ıslatma ve yapışma özellikleri sayesinde kompozitlerde yoğun bir şekilde tercih edilmektedir [3, 4]. Karbon elyaf sahip olduğu yüksek mukavemet, aşınma ve korozyon direnci gibi özellikler sayesinde, otomotiv, denizcilik ve uçak sanayi gibi çok farklı mühendislik alanlarında kullanılan malzemeler arasındadır [5]. Elyaf takviyeli kompozitlerin sertlik, mekanik özellik, işlenebilirlik ve aşınma gibi özelliklerinin iyileştirilmesi için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: huseyin.gurbuz@batman.edu.tr (H. Gürbüz)
Geliş / Received: 21.10.2024 Kabul / Accepted: 20.11.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1571365

mikro ya da nano boyutlu dolgu parçacıkları yaygın başvurulan bir yöntemdir. Dolgu parçacıklarının ağırlıkça ya da hacimsel oranı, geometrik şekli, kimyasal ve fiziksel özelliği kompozitlerin özelliklerini farklı şekillerde etkileyebilmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda SiO₂, Gr, TiO₂, Al₂O₃, B₄C gibi parçacıkların polimer matrisli kompozitlerin mekanik, termal, yorulma, aşınma, işlenebilirlik gibi özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır [6-10]. Farklı dolgu tipleri ve elyaf çeşitleriyle ilgili yapılan birçok çalışma mevcuttur. Ramesh ve Suresha [11], MoS₂ ve Al₂O₃ dolgululu karbon elyaf takviyeli kompozitlerde (KETK) Al₂O₃ dolgusunun kompozitlerin aşınma direncini MoS₂ dolgusundan daha fazla artırdığını belirlemişlerdir. Suresha vd. [12] Gr dolgusunun KETK'in aşınma kaybını düşürdüğünü, kayma mesafesi artışının ise aşınma hacmini artırdığını belirlemişlerdir. Cetkin vd. [8] aramid, mika ve B₄C dolgululu kompozitlerde aramid dolgusunun aşınma direncini daha fazla artırdığını gözlemlemişlerdir. Artan yükün dolgusuz ve dolgululu kompozitlerin aşınma kaybını artırdığını belirlemişlerdir. Suresha vd [13] Gr dolgu oranının KETK'lerde, kayma hızının, yükün ve kayma mesafesinin kompozitin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüksek dolgu oranlarının kütle kaybını düşürdüğünü, yük artışının ise kütle kaybının artırdığını tespit etmişlerdir. Artan kayma mesafesi ile aşınma hacmi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Shalwan ve Yousif [14] %3 Gr ilavesinde epoksinin çekme mukavemetinin düştüğünü, sertliğini ise artırdığını, belirtmişlerdir. Arslan vd. [15] karbon elyaf polipropilen matrisli kompozitlere sisal ilavesinin sertliği ve çekme mukavemetini düşürdüğünü ve sürtünme katsayısını ise artırdığını belirlemişlerdir. Lin vd. [16] polietereterekon matrisli kompozitlerde karbon elyaf ilavesinin ve artan karbon takviye oranının, kompozitin çekme mukavemetini artırdığını belirlemişlerdir. Karbon elyaf dolgusunun ZrO₂ dolgusuna kıyasla çekme dayanımını daha fazla artırdığını belirlemişlerdir. Her iki dolgu çeşidinin de (karbon elyaf, ZrO₂) kompozitin aşınma oranını düşürdüğü belirlemişlerdir. Omrani vd. [17] artan elyaf içeriğinin, kompozitin eğilme ve aşınma direncini geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Sürtünme katsayısı ve aşınma hacminin karbon elyaf oranı artışına bağlı olarak düştüğünü gözlemlemişlerdir. Hossain vd. [18] cam elyaf takviyeli kompozitlere farklı oranlarda nano karbon elyaf dolgusunun çekme ve eğme dayanımları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. En iyi çekme ve eğme dayanımlarını % 0.2 nano karbon dolgu oranında elde etmişlerdir. %0.2 dolgu oranında eğilme ve çekme mukavemetlerinin sırasıyla %49 ve %43 geliştiğini tespit etmişlerdir. Gao vd. [19] kısa karbon elyaf, kısa cam elyaf, Gr ve SiO₂ dolgululu epoksi kompozitlerde dolgu tiplerinin ve oranlarının tribolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısını dolgusuz epokside elde ederken, en düşük sürtünme kuvvetini ise Gr/SiO₂/kısa karbon dolgululu epoksidede elde etmişlerdir. Artan kayma hızında sürtünme katsayısının düştüğünü vurgulamışlardır. Karbon elyafın, cam elyaftan daha iyi bir aşınma performansı sergilediğini belirtmişlerdir.

KETK'lerin delinmesiyle ilgili çeşitli literatür çalışmaları bulunmaktadır [20-24]. Quan ve Zhong [20] matkap geometrisinin KETK'nin delinmesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Elde ettiği sonuçlarla matkap çapı arttığında delaminasyon değerinin arttığını, aynı zamanda ilerleme kuvveti ve torkun, delaminasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur. Tamura vd. [21] KETK'nin değişken ilerleme oranları ile delinmesini artırmışlardır. Düşük ilerleme oranının ilerleme kuvveti ve delaminasyon üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Qiu vd. [22] KETK'nin delinmesi sırasında ilerleme ve kesme hızını etkisini araştırmışlardır. İlerleme ve kesme hızı arttığında ilerleme kuvvetlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Hrechuk vd. [23] 3 farklı tip matkabın KETK'nin delinmesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Delme testleri sonucunda her üç matkap içinde delinen delik sayısının artmasıyla birlikte delaminasyon faktörünün, ilerleme kuvveti ve takım aşınmasının arttığını belirlemişlerdir. Durao vd. [24] kompozit malzemelerin delinmesinde farklı tip matkapların etkisini araştırmışlardır. İlerleme oranı arttığında ilerleme kuvvetinin arttığını aynı zamanda ilerleme kuvvetleri ile delaminasyon değerleri arasında doğru orantı olduğunu bulmuşlardır.

Bu çalışmanın amacı aynı oranda iki farklı dolgu tipi kullanarak üretilen KETK'lerin farklı işleme parametrelerinde, delme sırasında oluşan kuvvetleri ile delaminasyon oranının belirlenmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılmasını amaçlamaktadır.

2 Materyal ve metot

2.1 Delaminasyon faktörü ve ilerleme kuvvetlerinin ölçümleri

Kompozit malzemelerin delinmesinde en çok karşılaşılan hasar tiplerinden biri de delaminasyondur. Delik delme operasyonu sonucu oluşan delaminasyonlar delik çıkışından ölçülmüştür. Delik çıkışında oluşan delaminasyon değerleri hesaplanmasında Denklem 1'deki denklem kullanılmıştır. Delik delme sonrası kompozitlerin delik çıkışlarına ait görüntüler yüksek çözünürlüğe sahip kamerayla çekildikten sonra ImageJ programında bir cetvel yardımıyla ölçeklendirilerek delaminasyonlar hesaplanmıştır.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (1)$$

Burada F_d, D_o ve D_{max} sırasıyla; delaminasyon faktörünü, delik çapını ve deliğin çevresindeki en büyük hasar çapını temsil etmektedir. Delik delme esnasında kompozit malzemelerde oluşan ilerleme yönündeki kuvvetler 9257B model Kistler marka Dinamometre ile ölçülmüştür.

2.2 CNC tezgâhi ve kesici takım

Delik delme deneyleri kuru kesme şartlarında Brother marka CNC dik işleme tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan matkaplar Karcan kesici takım firmasından K3DF serili kesici takımlar satın alınmıştır. Matkaplar PVD kaplamalı olup geometrik özellikleri matkap

çapı 4 mm, uç açısı 118°, helis açısı 30° ve boşluk açısı 11° dir. İşleme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri **Tablo 1**'de verilmiştir. Kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılan Karcan kesici takım firmasına ait matkap **Şekil 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. Kesme parametreleri

Kesme hızı, Vc (m/dak)	Devir Sayısı, n (dev/dak)	İlerleme, f (mm/dev)
6.25	500	0.025
12.5	1000	0.05
25	2000	0.1
50	4000	0.2



Şekil 1. Deneylerde kullanılan matkap

2.3 Kompozitlerin üretimi

Dolgulu kompozitlerin üretiminde elyaf tipi olarak unidirectional karbon elyaf kumaş ve dolgu çeşidi olarak ise bor karbür (B₄C) ve grafit (Gr) kullanılmıştır. Karbon elyaf Karbomid firmasından, dolgu parçacıkları ise Ege nanotek firmasından temin edilmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde elle yatırma yöntemi uygulanmıştır. Arc marine firmasından temin edilen ARC 152 epoksi reçine ve sertleştiricisi, matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Katalog bilgileri doğrultusunda epoksi/sertleştirici oranı 4:1 oranında uygulanmıştır. Hassas terazi kullanılarak dolgu parçacıkları, karbon elyaf ve reçine miktarları belirlenen parametrelere tartılarak hazırlanmıştır. Ağırlıkça %7.5 B₄C ve %7.5 Gr parçacıkları epoksi reçine içine katılarak homojen bir dağılım sağlanması için uzun süre karıştırılmış ve sonrasında epoksi içine sertleştirici ilave edilerek karbon elyaflara sürülmek üzere hazır hale getirilmiştir. 30 cm x 30 cm boyutlarında kesilen karbon elyafların her katmanına, hazırlanan epoksi/dolgu karışımı bir rulo yardımıyla sürülerek 13 katmanlı dolgusuz ve hibrit dolgulu plakalar üretilmiştir. **Şekil 2**'de kompozitlerin üretim aşamaları ve deneysel kısımları gösterilmiştir.



Şekil 2. Malzemelerin üretim ve deneysel aşamaları

Tablo 2'de karbon elyaf ve dolgu parçacıklarının fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Karbon elyaf, B₄C ve Gr katalog bilgileri

	Karbon Elyaf	Gr	B ₄ C
Çekme Dayanımı	2500 MPa	Toz Boyutu 30 mikron	30 mikron
Elastite Modülü	230 GPa	Yoğunluk 2.09 - 2.23 g/cm ³	2.52 g/cm ³
Alansal Ağırlık	230 gr/m ²	Safılık %99.9	% 96
Kopma Uzaması	%1.4	Sertlik 0.25 GPa	27.4 - 34.3 GPa

2.4 Çekme ve eğilme testi

Eğme deneyleri, iş parçalarının kırılma ve eğme mekanizmalarının tespit edilmesinde uygulanan bir test yöntemidir. İki destek üstüne konulan dikdörtgen ya da daire kesitli malzemelerin orta noktasına iş parçası kırılana dek kuvvet uygulanarak yapılmıştır. Eğme testleri Shimadzu AG-IC marka cihazda ASTM D790 standartlarına göre 80 mm destek aralığı bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin mukavemetlerinin ölçülmesi amacıyla çekme testleri ASTM D638 standartlarına göre 250 kN kapasiteli universal Shimadzu AG-IC marka cihazda 1 mm/dak hızda yapılmıştır. Eğme numunesi ölçüleri 150 mm x 12.7 mm ve çekme numuneleri ölçüleri ise 250 mm x 25 mm'dir. Hibrit dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin eğme ve çekme dayanımları 3 kez tekrarlanarak elde edilen değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

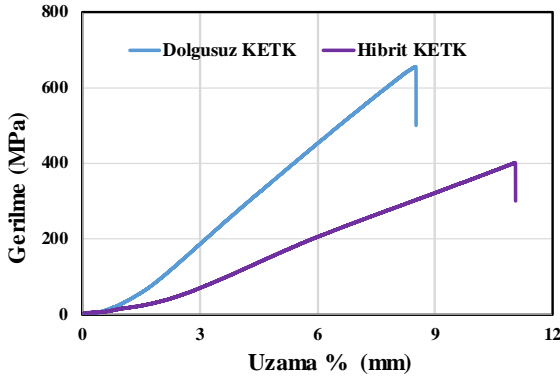
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Çekme ve eğme test sonuçları

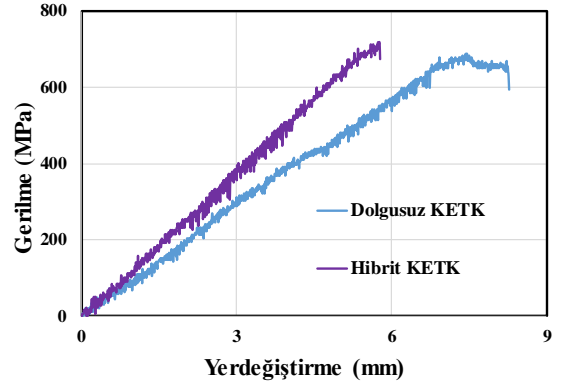
Çekme testi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerin belirlenmesinde en yaygın kullanılan test metodlarından biridir. Çekme cihazından bilgisayar yardımıyla alınan veriler sayesinde numunelerin gerilme - birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Dolgusuz ve hibrit dolgulu kompozitlerin gerilme - % uzama grafiği **Şekil 3**'te verilmiştir. **Şekil 3**'teki gerilme - % uzama grafiği incelendiğinde B₄C ve Gr dolgu ilavesinin KETK'in çekme mukavemetini azalttığı anlaşılmaktadır. Dolgusuz ve B₄C/Gr dolgulu hibrit kompozitin çekme mukavemetleri sırasıyla 655 MPa ve 401 MPa olarak elde edilmiştir. Dolguların elyaf takviyeli kompozitin çekme dayanımına olumsuz etki yapmasının sebebi artan dolgu ilavesinin matris içinde belirli alanlara yığılması, homojen dağılmaması, parçacıkların matris içinde gerilme yığılma bölgeleri oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Ozsoy vd. [25] elyaf takviyeli kompozitlerde dolguların mekanik özellikleri düşürmesinin nedenini, epoksi-dolgu-elyaf arasındaki zayıf bağlanma ve dolgu parçacıklarının homojen dağılmamasına atfetmişlerdir. Raju vd. [26] ise %10 dolgu ilavesinin elyaf takviyeli kompozitin çekme dayanımını iyileştirdiğini, bunun nedeninin ise ilave edilen partiküllerin hem homojen dağılması hemde elyaf yüzeyi ile etkileşime girerek hidrojen bağlarını güçlendirmesi olduğunu bildirmişlerdir.

Dolgulu elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde dolgu ile matris arasında yüzey bağlarının/yapışmalarının ve

uniform dolgu dağılımının, partikül takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi büyüktür. Matris ve elyaf arasındaki kuvvetli yüzey bağı, daha yüksek eğilme dayanımlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Dolgusuz ve B₄C/Gr hibrit dolgulu kompozitlerin eğilme test sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. Dolgu ilavesi KETK'in eğilme dayanımının 689 MPa'dan 719 MPa'a yükselmesini sağlamıştır. Dolgu malzemeleri eğilme yükleri altında kompozitlerin yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlamaktadır. Bu dolgular, çekme yüklemelerinde çatlak açılma mekanizmalarının aksine basma yükleri altında çatlakları kapatma işlevi görmektedir [27, 28]. Dolgu parçacıklarının gerilim oluşturmaktan ziyade, oluşan gerilimi elyaflara aktarma işlevi görmesi eğilme dayanımının artışı açıklamaktadır [28, 29]. Belirli bir dolgu oranının üstüne çıkılması durumunda eğilme dayanımının olumsuz etkileneceği yapılan önceki çalışmalarda ortaya konmuştur [25, 30, 31].



Şekil 3. Dolgusuz ve Gr/B4C dolgulu kompozitlerin gerilme % uzama grafiği

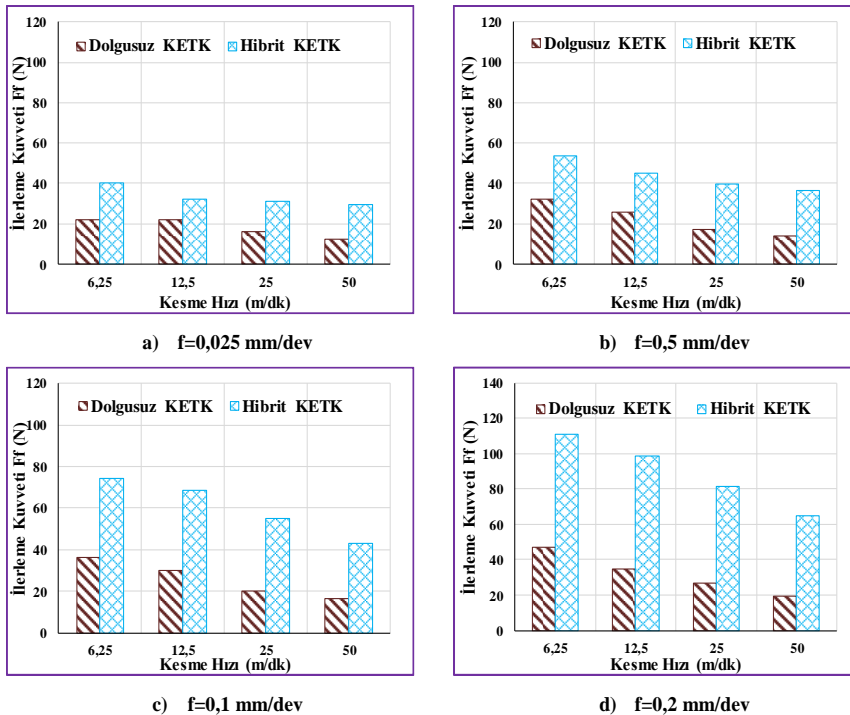


Şekil 4. Dolgusuz ve Gr/B₄C dolgulu kompozitlerin eğilme dayanımı grafiği

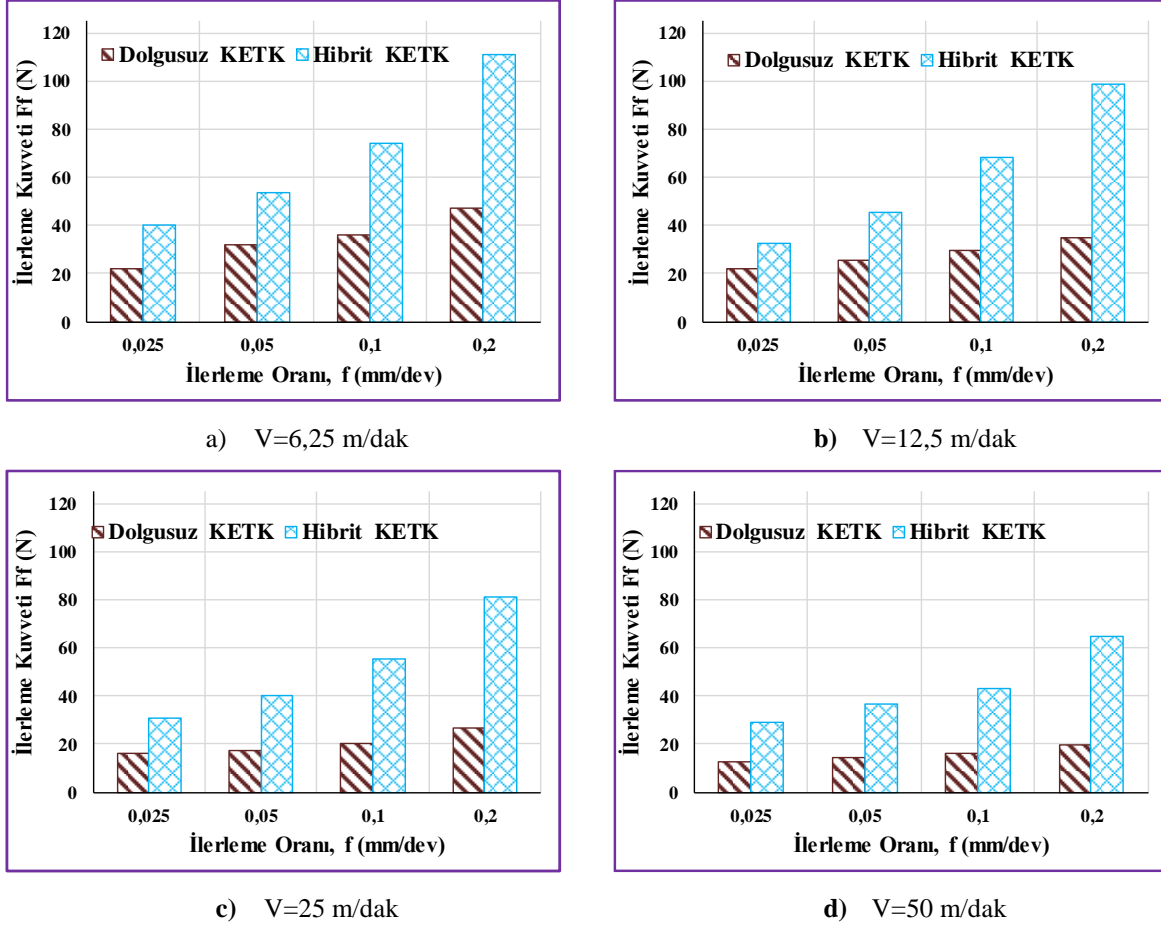
3.2 İlerleme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin dört farklı ilerleme ve dört farklı kesme hızında delinmesi esnasında kesici takımdan elde edilen ilerleme kuvvetleri değişimleri Şekil 5 ve Şekil 6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 5'teki grafiklere bakıldığında, ilerleme oranının artmasına paralel olarak ilerleme kuvvetlerinde bir artış olduğu görülmüştür.

Benzer sonuçları Durao vd. [32] çalışmalarında ortaya koymuşlardır. Quan vd. [33] ilerleme oranının artması ile ilerleme kuvvetlerinin arttığını ifade etmişlerdir. İlerleme kuvvetindeki bu artışın sebebi delik delme esnasında kesici takıma gelen birim zamandaki talaş yükünün artması ile açıklanabilir. Artan talaş miktarı kesici takımın daha fazla zorlanmasına ve bundan dolayı ilerleme kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır. Tamura vd. [34] çalışmalarında düşük ilerleme oranlarının ilerleme kuvveti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 5. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı ilerleme oranlarında elde edilen ilerleme kuvvetleri değerleri



Şekil 6. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı kesme hızlarında elde edilen ilerleme kuvvetleri değerleri

Bu çalışmada da düşük ilerleme oranları ilerleme kuvveti üzerinde olumlu etkiye sahip olmuştur. Kesme hızının artışına bağlı olarak dolgusuz ve hibrit KETK'lerin ilerleme kuvvetleri değişimine bakıldığında, artan kesme hızının dolgusuz ve hibrit kompozitlerde ilerleme kuvvetlerini düşürdüğü anlaşılmaktadır [35, 36]. Artan kesme hızı ile delinen kompozitlerin işlenmiş yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana gelmekte ve bu durumda kompozitlerin daha kolay bir şekilde işlenmesini sağlamaktadır. Dolgusuz ve hibrit kompozitlerin ilerleme kuvvetleri karşılaştırıldığında, hibrit kompozitlerin ilerleme kuvveti değerlerinin dolgusuz kompozitlerden daha yüksek çıktığı Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir. Hibrit kompozitlerde yüksek ilerleme kuvvetlerinin nedeni kompozit yapıda bulunan sert parçacıklara atfedilebilir.

3.3 Delaminasyon ölçümlerinin değerlendirilmesi

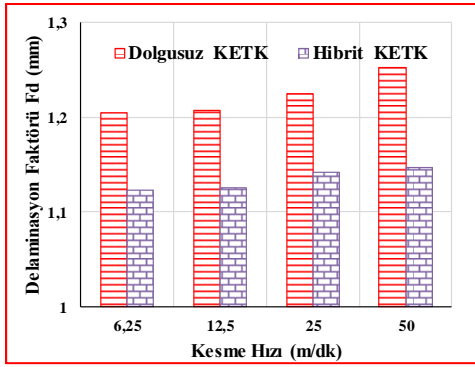
Hibrit ve dolgusuz KETK'lerin dört farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme hızlarında delinmesi sonucunda deliklerin çıkışında meydana gelen delaminasyonlar ölçülmüş olup, Şekil 7 ve Şekil 8'de grafiksel olarak verilmiştir.

Grafiklere bakıldığında, dolgusuz KETKlerin delaminasyon değerleri hibrit KETK'lerinkinden daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Kesme hızının artışı dolgusuz ve hibrit KETKlerin delaminasyon değerlerini arttırmıştır. Ortaya çıkan bu durum literatür ile paralellik arz etmektedir [37]. Kesme hızının artışına paralel olarak delik çevresindeki

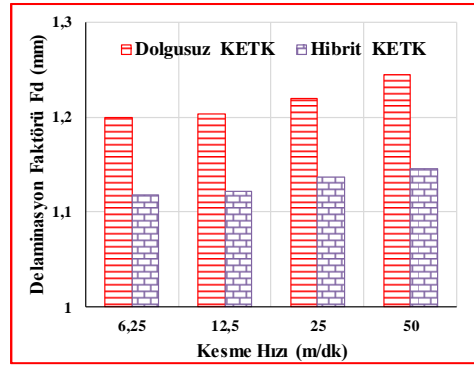
sıcaklık artmakta ve bu durumda deliğin çevresinde delaminasyon değerlerinin artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Kesme hızının artması ile işlenen kompozitin delik çevresinde sıcaklık artışı olmakta ve bu da kompozitin yapısını bozarak delaminasyon değerlerinin artmasına sebep olmaktadır.

Abroa vd. [38] yapmış oldukları çalışmada yüksek kesme hızlarının kesme bölgesindeki sıcaklık artışından dolayı bu bölgede delinmiş deliğin alanında daha fazla hasara uğradığını ifade etmişlerdir. İlerleme oranının artışı ise dolgusuz ve hibrit KETKlerin delaminasyon değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Qiu vd. [39] yapmış oldukları çalışmada benzer sonuç bulmuşlardır. Bu durum düşük ilerleme hızlarında kesme anında birim zamanda alması gerek yol daha düşük olduğu için kesici takım birim zamanda daha az malzeme kesmekte ve bu durumda kompozitin fiberlerine zarar vermektedir. Fakat Tamura vd. [34] yapmış oldukları çalışmada ilerleme oranının artması ile delik çevresindeki delaminasyonun arttığını ifade etmişlerdir.

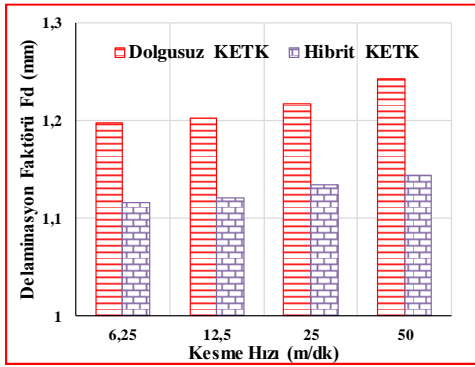
Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı işleme koşullarında delik delinmesi sonucunda delik çevresinde meydana gelen delaminasyonların görüntüsü Şekil 9'da verilmiştir. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin Şekil 9'daki görüntüleri karşılaştırıldığında, dolgusuz kompozitlerin delik çevresinde meydana gelen deformasyonların hibrit kompozitlere kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür.



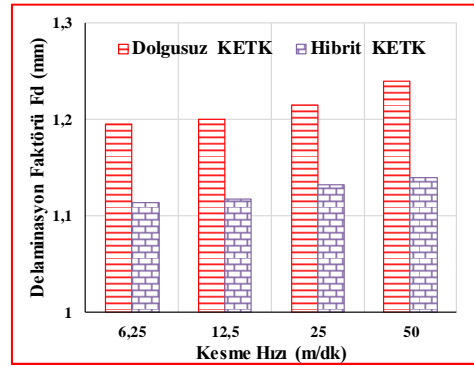
a) $f=0,025$ mm/dev



b) $f=0,5$ mm/dev

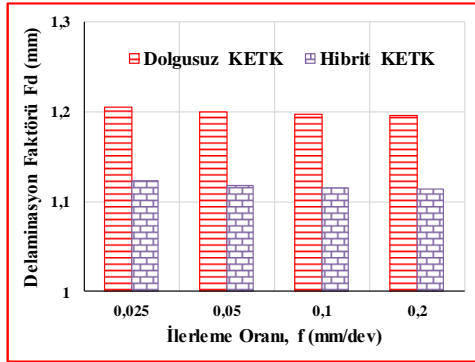


c) $f=0,1$ mm/dev

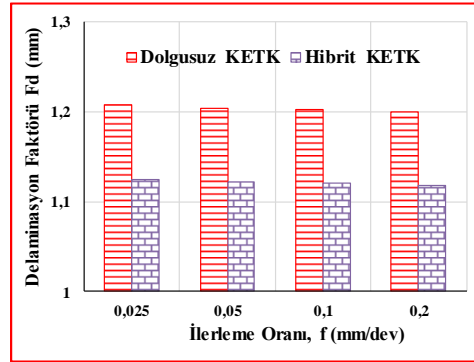


d) $f=0,2$ mm/dev

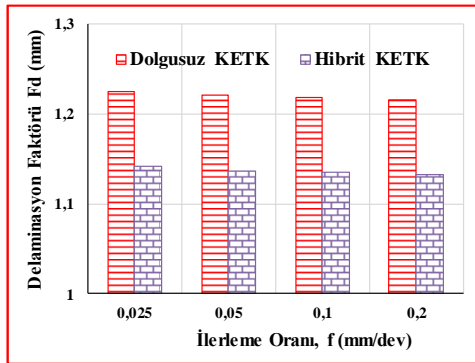
Şekil 7. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı ilerleme oranlarında ölçülen delaminasyon değerleri



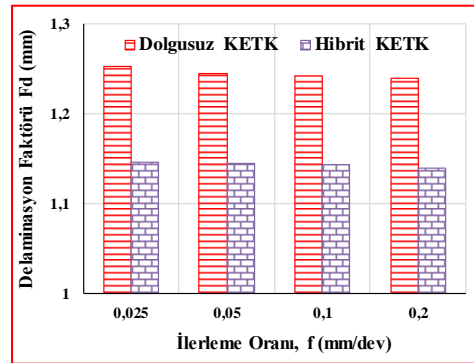
a) $V=6,25$ m/dak



b) $V=12,5$ m/dak

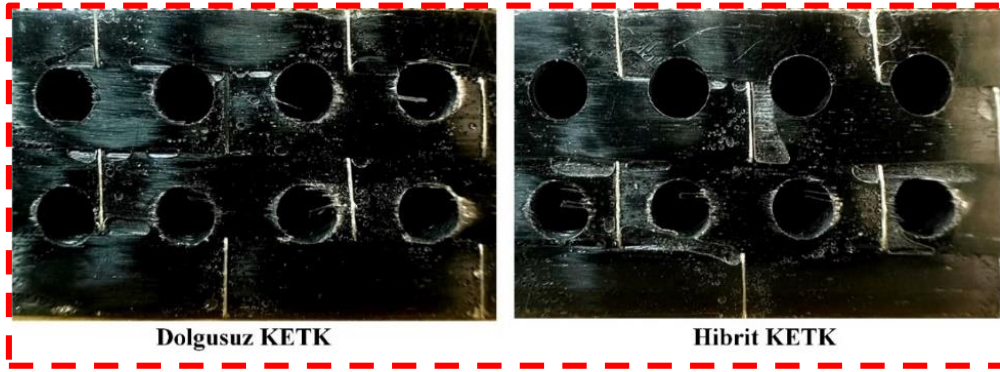


c) $V=25$ m/dak



d) $V=50$ m/dak

Şekil 8. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı kesme hızlarında ölçülen delaminasyon değerleri



Şekil 9. Dolgunsuz ve hibrit KETK'lerin delik delme sonrası delaminasyon görüntüleri

4 Sonuçlar

İki farklı dolgu tipi (B_4C ve Gr) kullanılarak üretilen hibrit KETK'lerin mekanik ve delik delme özellikleri dolgunsuz kompozitle kıyaslanmış ve önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- B_4C /Gr dolgulu hibrit kompozitlerin çekme dayanımı dolgunsuz KETK'ten daha düşük çıkmıştır. Dolgu parçacıkları çekme dayanımını olumsuz etkilemiştir.
- Eğme dayanımında ise dolgulu hibrit kompozit, dolgunsuz kompozitten daha yüksek bir dayanıma sahiptir. B_4C /Gr dolguları eğme dayanımı artışına katkı sunmuştur.
- Dolgunsuz ve hibrit KETK'lerin işleme parametrelerinde delinmesinde, ilerleme oranının artması ile ilerleme kuvvetlerinin arttığı, kesme hızının artmasıyla ise ilerleme kuvvetini düşürdüğü görülmüştür.
- Hibrit kompozitlerin ilerleme kuvvetleri dolgunsuz kompozitlerden yüksek çıkmıştır.
- İlerleme oranının artması delaminasyon faktörünün azalmasını sağlarken, kesme hızının artması ise delaminasyon faktörünü arttırmıştır.
- Dolgunsuz kompozitlerin delik çevresinde meydana gelen delaminasyon, hibrit kompozitlerden daha fazla olmuştur.

Teşekkür

Yazarlar, bu deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü katkı ve desteklerini sağlayan Batman Üniversitesi BAP birimine (BTÜBAP-2021-YL-020 no'lu proje) teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

[1] J. X. Chan, J. F. Wong, M. Petru, A. Hassan, U. Nirmal, N. Othman and R. A. Ilyas, Effect of nanofillers on tribological properties of polymer nanocomposites: A review on recent development. *Polymers*, 13 (17), 2867, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13172867>.

- [2] S. Basavarajappa, A. G. Joshi, K. Arun, A. P. Kumar and M. P. Kumar, Three-body abrasive wear behaviour of polymer matrix composites filled with SiC particles. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49 (1), 8-12, 2009. <https://doi.org/10.1080/03602550903206407>.
- [3] G. Divya, and B. Suresha, Role of metallic nanofillers on mechanical and tribological behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Materials Sciences and Applications*, 9 (9), 740-750, 2018. <https://doi.org/10.4236/msa.2018.99054>.
- [4] H. Rajashekaraiyah, S. Mohan, P. K. Pallathadka, and S. Bhimappa, Dynamic mechanical analysis and three-body abrasive wear behaviour of thermoplastic copolyester elastomer composites. *Advances in Tribology*, 2014 (1), 210187, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/210187>.
- [5] S. Shahabaz, P. Mehrotra, H. Kalita, S. Sharma, N. Naik, D. J. Noronha, and N. Shetty, Effect of Al_2O_3 and SiC nano-fillers on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy hybrid composites. *Journal of Composites Science*, 7 (4), 133, 2023. <https://doi.org/10.3390/jcs7040133>.
- [6] D. Bazgari, F. Moztafzadeh, A. Sabbagh-Alvani, M. Rasoulianboroujeni, M. Tahriri, and L. Tayebi, Mechanical properties and tribological performance of epoxy/ Al_2O_3 nanocomposite. *Ceramics International*, 44 (1), 1220-1224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.068>.
- [7] A. Nabhan, M. Taha, and N. M. Ghazaly, Filler loading effect of Al_2O_3/TiO_2 nanoparticles on physical and mechanical characteristics of dental base composite (PMMA). *Polymer Testing*, 117, 107848, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107848>.
- [8] E. Çetkin, M. E. Demir, and R. K. Ergün, The effect of different fillers, loads, and sliding distance on adhesive wear in woven e-glass fabric composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237 (2), 418-429, 2023. <https://doi.org/10.1177/09544089221136808>.
- [9] C. Kanchanomai, N. Noraphaipaksa, and Y. Mutoh, Wear characteristic of epoxy resin filled with crushed-silica particles, *Composites Part B: Engineering*, 42

- (6), 1446-1452, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.046>.
- [10] T. Raja, and Y. Devarajan, Investigation on boron carbide nanofiller-influenced epoxy polymer composite for thermal barrier applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 12623, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04334-2>.
- [11] B. Ramesh, and B. Suresha, Optimization of tribological parameters in abrasive wear mode of carbon-epoxy hybrid composites. *Materials & Design*, 59, 38-49, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.023>.
- [12] B. Suresha, B. Ramesh, K. Subbaya, B. R. Kumar, and G. Chandramohan, Influence of graphite filler on two-body abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Materials & Design*, 31 (4), 1833-1841, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.006>.
- [13] B. Suresha, S. Seetharamu, and P. S. Kumaran, Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Wear*, 267 (9-10), 1405-1414, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.026>.
- [14] A. Shalwan, and B. Yousif, Influence of date palm fibre and graphite filler on mechanical and wear characteristics of epoxy composites. *Materials & Design*, 59, 264-273, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.066>.
- [15] M. Aslan, M. Tufan, and T. Küçükömeroğlu, Tribological and mechanical performance of sisal-filled waste carbon and glass fibre hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 140, 241-249, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.039>.
- [16] G. M. Lin, G. Y. Xie, G. X. Sui, and R. Yang, Hybrid effect of nanoparticles with carbon fibers on the mechanical and wear properties of polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 43 (1), 44-49, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.029>.
- [17] E. Omrani, B. Barari, A. D. Moghadam, P. K. Rohatgi, and K. M. Pillai, Mechanical and tribological properties of self-lubricating bio-based carbon-fabric epoxy composites made using liquid composite molding. *Tribology International*, 92, 222-232, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.007>.
- [18] M. K. Hossain, M. E. Hossain, M. Hosur, and S. Jeelani, Flexural and compression response of woven E-glass/polyester-CNF nanophased composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (11), 1774-1782, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.033>.
- [19] C. Gao, G. Guo, F. Zhao, T. Wang, B. Jim, B. Wetzel, G. Zhang, and Q. Wang, Tribological behaviors of epoxy composites under water lubrication conditions. *Tribology International*, 95, 333-341, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.041>.
- [20] Y. Quan, W. Zhong, Investigation on drilling-grinding of CFRP. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 4, 60-63, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11465-009-0008-y>.
- [21] S. Tamura, T. Matsumura, Delamination-free drilling of carbon fiber reinforced plastic with variable feed rate. *Precision Engineering*, 70, 70-76, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.003>
- [22] X. Qiu, P. Li, C. Li, Q. Niu, A. Chen, P. Ouyang, T.J. Ko, Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP. *Composite Structures*, 203, 404-413, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.007>.
- [23] A. Hrechuk, V. Bushlya, R. M'Saoubi, J.E. Ståhl, Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP. *Procedia Manufacturing*, 25, 294-301, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.086>.
- [24] L.M.P. Durão, D.J. Gonçalves, J.M.R. Tavares, V.H.C. de Albuquerque, A.A. Vieira, A.T. Marques, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite structures*, 92 (7), 1545-1550, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.
- [25] I. Ozsoy, A. Demirkol, A. Mimaroglu, H. Unal, and Z. Demir, The influence of micro-and nano-filler content on the mechanical properties of epoxy composites. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 61 (10) ,601-609, 2015. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2015.2632>.
- [26] B. R. Raju, B. Suresha, R. P. Swamy, and B. S. G. Kanthraju, Investigations on mechanical and tribological behaviour of particulate filled glass fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1, 160-167, 2013. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2013.14027>.
- [27] A. Patnaik, and A. D. Bhatt, Mechanical and dry sliding wear characterization of epoxy-TiO₂ particulate filled functionally graded composites materials using Taguchi design of experiment. *Materials & Design*, 32 (2), 615-627, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.011>.
- [28] P. O. Hagstrand, F. Bonjour, and J. A. Manson, The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (5), 705-714, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.03.007>.
- [29] B. Hulugappa, M. V. Achutha, and B. Suresha, Effect of fillers on mechanical properties and fracture toughness of glass fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 4 (1), 1-14, 2016. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2016.41001>.
- [30] Bhatia, S. Angra, and S. Khan, A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite. *Advanced Composite Materials*, 30 (4), 307-337, 2021. <https://doi.org/10.1080/09243046.2020.1759482>.
- [31] Rodrigues, and J. Broughton, Silane surface modification of boron carbide in epoxy composites.

- International Journal of Adhesion and Adhesives, 46, 62-73, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jadhadh.2013.05.014>.
- [32] L. M. P. Durão, D. J. Gonçalves, J. M. R. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, A. A. Vieira, and A. T. Marques, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite structures*, 92 (7), 1545-1550, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.
- [33] Y. Quan, and W. Zhong, Investigation on drilling-grinding of CFRP. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 4, 60-63, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11465-009-0008-y>.
- [34] S. Tamura, and T. Matsumura, Delamination-free drilling of carbon fiber reinforced plastic with variable feed rate. *Precision Engineering*, 70, 70-76, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.003>.
- [35] X. Qiu, P. Li, C. Li, Q. Niu, A. Chen, P. Ouyang, T. J. Ko, Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP. *Composite Structures*, 203, 404-413, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.007>.
- [36] V. Krishnaraj, A. Prabukarthi, A. Ramanathan, N. Elanghovan, M. S. Kumar, R. Zitoune, and J. Davim, Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. *Composites Part B: Engineering*, 43 (4), 1791-1799, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.007>.
- [37] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. Abrao, A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology*, 67 (9), 1939-1945, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.009>.
- [38] A. Abrao, P. Faria, J. C. Rubio, P. Reis, and J. P. Davim, Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (1-3), 1-7, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146>.
- [39] X. Qiu, P. Li, Q. Niu, A. Chen, P. Ouyang, C. Li, and T. J. Ko, Influence of machining parameters and tool structure on cutting force and hole wall damage in drilling CFRP with stepped drills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 857-865, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1981-2>.





Yüksek gerilim porselen izolatör sırlarında mermer atık tozunun alternatif hammadde olarak kullanımı

Using marble waste dust as an alternative raw material in glazes for high voltage porcelain insulators

Aliosman Tiryaki¹ , Müge Tarhan^{2,*} 

^{1,2} Uşak Üniversitesi, GSF, Seramik Bölümü, Ankara İzmir Yolu 8. km Bir Eylül Kampüsü, 64200, Uşak, Türkiye

¹ Ankara Seramik A.Ş. Ar-Ge Merkezi, 1. O.S.B. Osmanlı Caddesi No:15, 06930 Sincan, Ankara, Türkiye

Öz

Günümüzde artan enerji tüketimi ve yeni yerleşim ya da sanayi bölgelerinin kurulması yeni enerji hatlarına ve izolatörlere olan ihtiyacı da arttırmaktadır. İzolatör çeşitlerinden biri olan porselen izolatörler hala alanında en çok tercih edilen izolatör tipi olarak kabul edilmektedir. İzolatörlerin yüzeylerinde izolatör bünyesini korumak, ürün mukavemetini arttırmak ve gerekli elektriksel özellikleri sağlamak için sır tabakası bulunmaktadır. Porselen izolatör sırlarında kuvars, feldspat, kil, kaolen, kalsit, dolomit ve renklendirici oksit ya da pigment kullanılmaktadır. Porselen izolatör üretimindeki artış dolayısıyla sır tüketimini de arttırmaktadır. Artan maliyetler ve kaynakların tükenmesi sektörü alternatif ham madde kaynakları arayışına yöneltmiştir. Ayrıca miktarsal olarak hızla artan atık miktarı dünyamızın geleceği için tehdit oluşturmaktadır ve çevre kirliliğinin başlıca nedenlerinden biridir. Yapılan bu çalışmada yüksek gerilim porselen izolatörlerinde kullanılan sır reçetesinde yer alan kalsit ve dolomit yerine mermer atığı kullanılarak yeni sır reçeteleri oluşturulmuştur. Oluşturulan reçetelerin uygulandığı porselen izolatör bünyelerin fiziksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca sır reçetelerinin reolojik özellikleri, ısıl davranışları ve faz analizleri incelenmiştir. Sonuçlara göre mermer atık tozunun kullanımı ile standart sıra benzer teknik özellikler elde edilmiş, yaklaşık % 7 oranında mermer atığının izolatör sırlarında kullanılabileceği belirlenmiştir. Mermer atık tozlarının yüksek gerilim porselen izolatör sırlarında değerlendirilmesi; çevresel, mekanik, kimyasal ve ekonomik olarak fayda sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Mermer atık tozu, Mermer atığı, Porselen izolatör, Yüksek gerilim izolatör, Sır

1 Giriş

Mermer ve doğal taşların yapı sektöründe ve mekân iç tasarımlarında kaplama malzemesi olarak kullanımı dünya genelinde artmaktadır. Bu artışın sonucunda, mermer sektörüne olan talep ve fabrika sayısında da bir artış gerçekleşmektedir [1-3]. Ülkemiz dünya mermer kaynaklarının %40'ına sahip olmakla birlikte bulunduğu coğrafi konumundan dolayı oldukça zengin bir mermer

Abstract

Today, increasing energy consumption and the establishment of new settlements or industrial zones also increase the need for new energy lines and insulators. Porcelain insulators, one of the types of insulator materials, are still considered the most preferred insulator type in the field. These insulators have a glaze layer on their surfaces to protect the insulator structure, increase product strength and provide the necessary electrical properties. Quartz, feldspar, clay, kaolin, calcite, dolomite and coloring oxide or pigment are used in porcelain insulator glazes. The increase in porcelain insulator production also increases glaze consumption. Increasing costs and resource depletion have led the sector to seek alternative raw material sources. In addition, the rapidly increasing amount of waste poses a threat to the future of our world and is one of the main causes of environmental pollution. In this study, new glaze recipes were created by using marble waste instead of calcite and dolomite in the glaze recipe used in high voltage porcelain insulators. The physical and optical properties of the porcelain insulator bodies to which the created recipes were applied were examined. In addition, the rheological properties, thermal behaviors and phase analyses of the glaze recipes were examined. According to the results, technical properties similar to the standard glaze were obtained with the use of marble waste dust, and it was determined that approximately 7% of marble waste could be used in insulator glazes. As a result of the study, the evaluation of marble waste in high voltage porcelain insulator glazes is beneficial in environmental, mechanical, chemical and economic terms.

Keywords: Marble waste dust, Marble waste, Porcelain insulator, High voltage insulator, Glaze

çeşitliliğine de sahiptir. Dünya mermer rezervinde lider olan Türkiye, bu rezervi etkili bir biçimde değerlendirememektedir. Üreticilerin mermer üretim kapasitesine bağlı olarak, mermer çamuru, mermer parçaları ve mermer kesim tozu gibi farklı mermer atıkları oluşmaktadır. Mermer üretimi ve işlenmesi sırasında üretimin %50-70'i atık olarak ayrılmaktadır. Mermer atık tozu mermer üretimi sırasında ve ocaklarda kullanılan kesim

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muge.tarhan@usak.edu.tr (M. Tarhan)

Geliş / Received: 23.10.2024 Kabul / Accepted: 28.11.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1571659

aletlerinin kesim sürecinde oluşur. Bu tür atıklar çevreye dağıldığında inertsiz olarak sınıflandırılrsa da, son derece ince taneleri, toprağın geçirgenliği ve yağmur suyu filtrasyon süreçleri nedeniyle metamorfizma sonucunda ciddi zararlar verebilmektedir. Bu nedenle, mermer atık tozunun geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması, doğal çevre üzerindeki zararlı etkilerin ortadan kaldırılmasına yardımcı olarak doğanın korunmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, mermer atıklarının üretimde kullanılması ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır. [4]. Atıl durumdaki malzemelerin üretime kazandırılması, doğal kaynakları koruyup aynı zamanda çevreyi ve doğal dengeyi zarara uğratmadan üretim yapılmasına olanak sağlar. Kullanım alanı belirlendikten sonra atıl hammaddelerin tekrar üretime kazandırılması, ürün çeşitliliğine, maliyetin düşmesine, endüstriye yeni kaynakların kazandırılmasına, diğer kaynakların korunmasına, enerji ve doğal dengenin korunmasına katkı sağlamaktadır [5-6].

Esas olarak mermer atıkları CaCO_3 , CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O_3 ve Na_2O içermektedir. Mermer tozu, ince taneli parçacıkların yüksek konsantrasyonu ve düşük metal oksit seviyeleri nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Bu ince öğütülmüş kalsiyum karbonat parçacıkları, kolayca toplanabilir ve çeşitli endüstriyel kullanımlar için pazarlanabilir. Literatürde, mermer atığının çeşitli alanlarda kullanımıyla ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, mermer atığının birçok uygulamaya entegre edilebileceğini ve hammadde olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Mermer atığının, kil ürünleri, beton, harçlar, çimento ve boyalar gibi geniş bir inşaat malzemesi yelpazesinin üretiminde kullanımı, giderek artan bir ilgi görmektedir [7-20]. Ancak, endüstriyel seramik ürünleri, endüstriyel seramik bünye ve sırları ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ramos vd. [19] mermer atığını kırmızı pişirilmiş duvar karoları üretiminde hammadde olarak kullanma olasılığını araştırmıştır. Çalışmada, doğal kalsitli malzeme yerine mermer atığı maksimum ağırlıkça %15 oranında kullanılmıştır. Mermer atığının kullanılmasının, daha düşük pişirme sıcaklıklarında bile üstün teknik özelliklere sahip kırmızı pişirilmiş duvar karoları üretimini sağladığı belirlenmiştir [19]. Acchar [7], mermer ve granit atıklarının, özelliklerini koruyarak kil ürünlerinde kullanılma olasılığı üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu atıkların, kil malzemelerinin %50'sine kadar alternatif bir hammadde olarak hizmet etme potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Bu atıkların kullanılmasıyla, geleneksel kil ürünlerine kıyasla teknik özelliklerin iyileştirilmesi mümkün olmuştur [7]. Yeşilay vd. [16] mermer atığını kullanarak sanatsal nesnelere için transparan sırların geliştirilmesini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada mermer atıkları hammadde olarak transparan sırların bileşiminde %40'a kadar farklı oranlarda kullanılmıştır. Çalışmada, kullanılan atık miktarına bağlı olarak farklı renkler ve yüzey dokuları elde edilmiştir. Mermer atığının kullanımının, yüksek kalsit içeriği nedeniyle opaklığı artırdığı tespit edilmiştir [16]. Buyuksagis vd. [13] farklı miktarlarda mermer atık katkılarının derz harcındaki kullanılabilirliğini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, derz harcındaki bağlayıcının mermer atığı ile değiştirilmesi, fiziksel ve mekanik

özelliklerin düşmesine neden olmuştur. Ancak, su emme artışına karşın önlemler alındığında, seramik derz harçlarında %10'a kadar mermer atığının kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

Elektroporselen sırları diğer porselen sırları gibi karmaşık yapıya sahip yapılarıdır. Elektroporselen sırlarının görevleri arasında üründe mukavemet artışını sağlaması ve elektrik akımının yüzeyden hareketini sağlayacak yüzey oluşturmaktır. Bunu yanında izolatöre renk vermek ve kir tutmasını azaltacak yüzey oluşturmada da elektroporselen sırlarının sağladığı faydalar arasındadır. Genel olarak kahverengi renkte olan izolatörler kullanılan yerlerin ve firmaların tercihlerine göre beyaz ve gri renklerde de kullanılmaktadır. Sulu öğütme yöntemi ile hazırlanan izolatör sırlarında kil, kaolen, potasyum feldispat, sodyum feldispat, kuvars, kalsit, dolomit ve çeşitli renk pigmentlerde kullanılmaktadır. Uygun tane boyutuna öğütülen ham maddeler eleklerden geçirilerek sırlama prosesine hazır hale getirilir [21].

Elektroporselen üretiminde üç farklı sırlama yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar daldırma, akıtma ve püskürtmedir. Daldırma yöntemi seri üretime daha uygun olduğu ve elektroporselen ürününün geometrisine daha uygun olduğu için esas kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde ürünün sır içinde kalma süresi, sır yoğunluğu ve sır viskozitesi ürünün sır kalitesini etkileyen parametrelerdir. Diğer önemli husus ise ürünün geometrisinden kaynaklı olarak çukur bölgelerde sırn birikmemesi ve sır kalınlığının farklı olmaması için iyice süzdürülmelidir. Akıtma yöntemi ise daha çok büyük hacimli ürünlerde tercih edilmektedir. Bu yöntemde sır farklı tiplerde çıkış ağızları ile malzemenin üzerine sır akıtılarak uygulanır. Bu yöntem de sır çıkışının ve malzeme üzerine uygulanan sırların akışının homojenliği ile sır yoğunluğu sırlama işleminin performansını etkileyen etkenlerdir. Diğer bir yöntem ise püskürtmedir. Bu yöntemde pistole ya da sırlama robotları kullanılmaktadır. Yüzeğe uygulanan sır miktarının eşit olması karmaşık geometriye sahip ürünlerde zor olsa da izolatör üretiminde kullanılan yöntemlerdendir [21].

Bu çalışmanın amacı, mermer üretim tesislerinde oluşan mermer atık tozunun yüksek gerilim porselen izalatör sırlarında kalsit ve dolomit yerine bir alternatif olarak kullanılmasını araştırarak doğal kaynakların korunmasını sağlamak ve bilinçsiz tüketimi en aza indirmektir.

2 Materyal ve metod

2.1 Kullanılan hammaddeler

Sır reçetelerinde kullanılan sodyum feldispat, potasyum feldispat, dolomit, manyezit, kalsit, kuvars, kil ve kaolen hammaddeleri Ankara Seramik A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Sır reçetelerinde kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri Tablo 1'de verilmiştir. Reçetelerde renklendirici olarak demir (Fe) (%27- %33), krom (Cr) (%25-%30) ve mangan (Mn) (%22 - %28) içerikli kahverengi pigment kullanılmıştır. Mat sır kompozisyonunda kalsit ve dolomit yerine mermer atığı kullanılmasının etkileri sabit Seger oranında geliştirilen reçetelerle incelenmiştir. Bu nedenle standart sırn Seger oranı sabit tutularak mermer atığı ile geliştirilen tüm sırlar

Tablo 1. Sır reçetelerinde kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimleri (% ağı.)

Hammaddeler	A.Z.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
K- feldispat	0.32	69.59	16.53	0.14	0.04	0.37	0.06	2.36	10.53
Na-feldispat	0.23	70.18	18.13	0.05	0.18	0.54	0.13	10.28	0.17
Kuvars	0.15	99.19	0.34	0.02	-	0.02	0.04	0.19	0.04
Kalsit	43.56	0.88	0.7	-	-	55.16	0.2	-	-
Dolomit	47.34	0.34	0.16	0.04	-	32.16	19.57	0.04	0.05
Kil	7.0	61.00	25.0	1.5	1.7	0.4	0.6	0.5	2.3
Kaolen	12.33	51.49	34.16	0.78	0.49	0.11	0.01	0.05	0.2
Mermer atık	42.3	0.83	0.2	0.04	0.01	56.01	0.53	-	0.02
Manyezit	47.45	4.18	0.21	0.65	-	2.74	44.66	-	-

standart sırla aynı Seger değerlerine sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Standart sırnın Seger değerleri **Tablo 2**'de verilmiştir. Bu reçete kompozisyonlarında alkali oksit, toprak alkali oksit oranları ile SiO₂ ve Al₂O₃ oksitleri için sabit Seger oranlarında çalışılırken reçete kompozisyonlarına artan oranlarda mermer atığı girilmiştir.

Tablo 2: Standart sır ile geliştirilen sırların Seger değerleri

Seger formülü (mol)	
ZnO	0.000
CaO	0.382
MgO	0.208
K ₂ O	0.158
Na ₂ O	0.252
Al ₂ O ₃	0.614
Fe ₂ O ₃	0.007
B ₂ O ₃	0.000
SiO ₂	4.720
TiO ₂	0.015
ZrO ₂	0.000

Kimyasal analizler incelendiğinde atık numunesinin kalsite çok yakın bir kimyasal analize sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte dolomit hammaddesinin de önemli oranda kalsiyum oksit içerdiği görülmektedir. Bu nedenle geliştirilen reçetelerde kalsiyum oksit kaynağı olarak kullanılan kalsit ve dolomit yerine %56.01 oranında kalsiyum oksit içeren mermer atığı kullanılmıştır. Dolomit yüksek miktarda kalsiyum oksitin yanı sıra magnezyum oksit de içerdiği kimyasal analizlerden görülmektedir. Bu nedenle dolomit yerine atık kullanılan sır kompozisyonlarında Seger oranlarının standart sır Seger oranlarında kalması için sır reçetelerine manyezit hammaddesi de ilave edilmiştir (**Tablo 2** ve **Tablo 4**).

Standart sır reçetesinde kullanılan kalsit ve dolomit hammaddeleri ile bu hammaddelere alternatif olarak kullanımı araştırılan mermer atık tozu ile birlikte manyezit

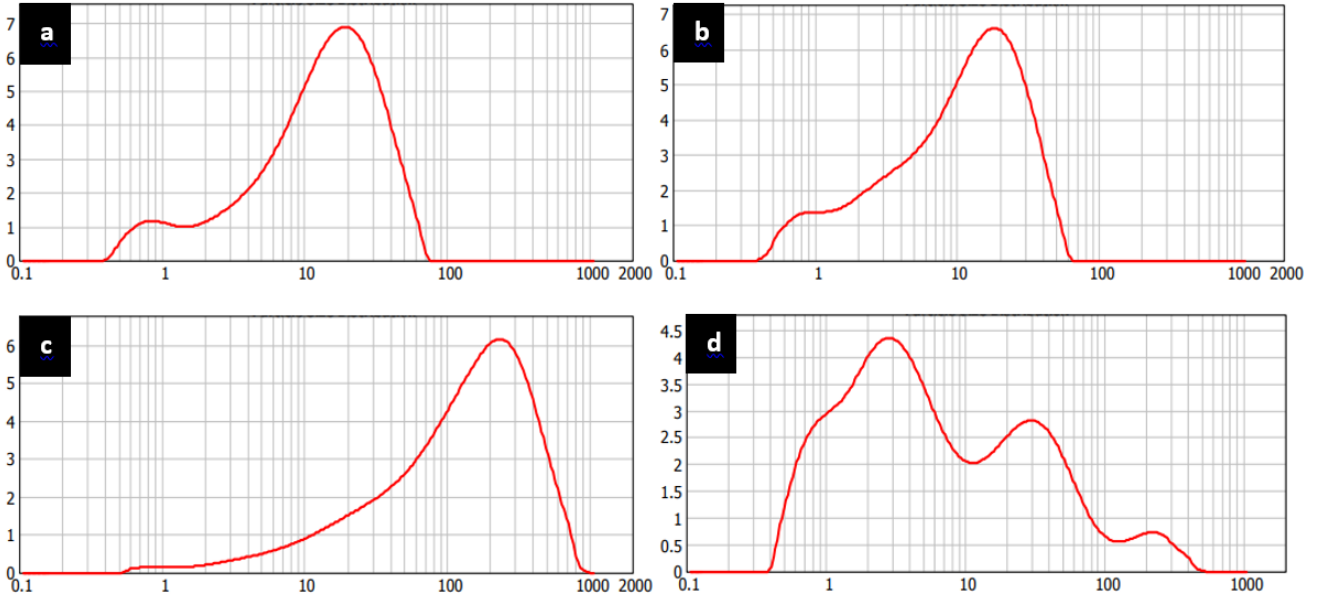
hammaddelerine ait D10-D50 ve D90 tane boyut değerleri ve tane boyut grafikleri sırasıyla **Tablo 3** ve **Şekil 1**'de verilmiştir. Kalsit ve dolomit hammaddelerinin ortalama tane boyutları birbirine yakın olmakla birlikte tane boyut dağılımları geniş bir aralıkta homojen bir dağılım göstermiştir. Mermer atık tozu ise homojen bir tane boyut dağılımına sahip olmakla birlikte ortalama tane boyutu kalsit ve dolomite göre belirgin şekilde çok daha yüksektir (**Tablo 3**). Manyezit hammaddesinin ortalama tane boyutu ise kalsit ve dolomite daha yakın olmakla birlikte iki tepeli bir tane boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 3: Hammaddelerin D10-D50 ve D90 tane boyut değerleri

Hammaddede/ μ	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
Kalsit	2.13	14.15	37.49
Dolomit	1.65	11.78	32.18
Mermer atık tozu	16.73	143.78	424.21
Manyezit	0.94	4.80	55.91

2.2 Deneysel çalışmalar ve bünye geliştirme çalışmaları

Oluşturulan sır reçetelerinin hazırlanması, tartım ve öğütme işlemleri Ankara Seramik A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan reçeteler 500 gr kapasiteli alümina laboratuvar değirmeninde, 300 ml su ile 45 μ elek analizi elek bakiyesi %0.3 olana kadar öğütülmüştür. Sırların öğütme sonrası yoğunluk ve vizkosite değerleri sırasıyla piknometre ve 4mm çaplı Ford kap ile ölçülmüştür. Sırların yoğunluk değerleri 1415-1430g/lt aralığında, viskozite değerleri ise 15-16.5 saniye arasında ölçülmüştür. Sırlar 125 mikronluk bir elekten elenerek daldırma yöntemi ile elektroporslen plakalar üzerine uygulanmış ve Ankara Seramik A.Ş. şirketi endüstriyel pişirim fırınında tepe noktası 1215 °C olan 36 saatlik fırın programında pişirilmiştir.



Şekil 1. Reçetelerde kullanılan hammaddelerin tane boyut analizleri a) Kalsit, b) Dolomit, c) Mermer atık tozu, d) Manyezit

Tablo 4. Standart ve mermer atığı ile geliştirilen sır reçeteleri (%)

Hammaddeler	STD	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
K-feldispat	29	29	29.1	29.1	29.1	29.1
Na-feldispat	27	27	27.1	27.1	27.1	27.1
Kuvars	16	16	16.07	16	15.9	15.86
Kalsit	3	-	3	3	3	-
Dolomit	9	9	5	2	-	-
Kil	11	11.1	11.1	11	11	11.08
Kaolen	5	5	5	5	5	5
Mermer atık	-	2.97	2.26	3.9	5	7.96
Manyezit	-	-	1.74	3.03	3.9	3.87
Kahverengi pigment	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5

Farklı oranlarda mermer atığı kullanılarak hazırlanan sırlardan belirlenen sırlar için sinterlenme davranışlarının (sinterleme, yumuşama ve erime noktası) değerlendirilmesi Misura ODHT HSM 1600/80 ısıtma mikroskobu (Misura 3.32 ODHT-HSM 1600/80) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sırlardaki kristal fazların tanımlanması, Rigaku MiniFlex X-ışını kırınımı ile $2\theta = 10^\circ-70^\circ$ aralığında $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızında 40 kV ve 30 mA'da monokromatik Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sırların yüksek sıcaklıkta göstermiş olduğu akma davranışları 45° lik alçı plaka yardımıyla ölçülmüştür. Hazırlanan sır numuneleri kurutulularak plastik hale getirilip eşit miktarlarda sır akış piramitlerine yerleştirilmiştir. Hazırlanan sır akış piramitleri işletme fırınında, işletme rejiminde pişirilmiştir ve sır akma boyları belirlenmiştir. Sırların renk değerleri (L^* , a, b) spektrofotometre (Minolta Konica) kullanılarak belirlenmiştir. Sırların sertliği Mohs ölçeği standartlarına (alçıtaşı, kalsit, florit, apatit, ortoklaz, kuvars, topaz ve korindon) göre sertlik kalemi ile

ölçülmüştür. Hazırlanan sırların bünye pişmiş mukavemeti üzerindeki etkisini görmek için porselen izolatör reçetesinden hazırlanan 30 mm çapında ve 100 mm uzunluğundaki mukavemet çubukları ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilmiştir. Daha sonra bu mukavemet çubukları daldırma yöntemi ile sırlanmıştır. Sırlı numunelerin pişme sonrası mukavemet değerleri ZwickRoell Z020 üç nokta eğme yöntemiyle ölçülmüştür.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Reolojik özellikler

Porselen izolatör sırında mermer atık ilavesinin akışkanlık özellikleri incelenmiş ve Tablo 5'te verilmiştir. Standart porselen izolatör sırları ile aynı Seger oranlarında ve artan mermer atık ilavesi ile geliştirilen sırlar için standart sır ile benzer yoğunluk değerlerinde benzer viskozite değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar porselen izolatör sır reçetesinde kalsit ve dolomit yerine mermer atığı kullanılmasının sırların reolojik özelliklerinde belirgin bir farklılık yaratmadığını göstermektedir. Seramik sırlarının akışkanlık özellikleri, seramik ürünlerin yüzey kaplamasında büyük bir öneme sahiptir. Bu akışkanlık, sırların pişirme sırasında nasıl yayılacağını ve yüzeyde nasıl düzgün bir tabaka oluşturacağını belirler. İyi akışkanlığa sahip bir sır, seramik yüzeyine homojen bir şekilde yayılır. Bu, sırların kalınlığının eşit olmasını sağlar ve yüzeyde lekelerin, kabarcıkların veya boşlukların oluşma olasılığını azaltır. Sırların akışkanlık özellikleri, sırlama sürecindeki hataları minimize ederek sırların istenilen kalınlık, parlaklık, doku ve renkte elde edilmesine olanak sağlar [22]. Bu açıdan değerlendirme yapıldığında, porselen izolatör sırında mermer atık tozunun kullanımının ürünlerin kalitesini ve estetik görünümünü artırmada kritik bir rolü olan sırların akışkanlık özelliklerini değiştirmediklerinden endüstriyel uygulamalar açısından problem teşkil etmeyeceği öngörülmektedir.

Tablo 5. Sırların reolojik özellikleri

	STD	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
Yoğunluk (g/lt)	1415	1426	1419	1420	1425	1422
Viskozite (sn.)	15.88	16.09	16	15	15.25	16.18

3.2 Fiziksel ve optik özellikler

Oluşturulan reçetelerle sırlanan elektroporselen çubuklara ait mukavemet sonuçları **Tablo 6**'da yer almaktadır. Tablodaki mukavemet değerleri incelendiğinde standart reçete ile sırlanan mukavemet değerine en yakın değeri MA3 reçetesi ile elde edilmiştir. Genel mukavemet değerleri açıdan değerlendirdiğinde deneme sırları ile elde edilen mukavemet değerlerinin standart reçeteden çok farklı olmadığı ve deneme sırlarının mukavemet açısından sorun oluşturmayacağı öngörülmüştür.

Yapılan çalışmalarda oluşturulan renk değerleri incelenmesinde Lab modeli kullanılmıştır. Bu model de L(beyazlık) parlaklığı ifade eder. 0 (siyah) ile 100 (beyaz) arasında bir değerdir. a değeri ise yeşil kırmızı eksenini temsil eder. Pozitif değerler olmasa kırmızıya, negatif değerler olmasa ise yeşile doğru renk kayması olduğunu temsil eder. Tabloda yer alan b değeri de mavi-sarı eksenini belirtmektedir. Aynı a değerinde olduğu gibi pozitif ve negatif değerler alır. Pozitif değerler sarıya, negatif değerler ise maviye doğru renk kayması olduğunu göstermektedir. Hazırlanan deneme reçeteleri incelendiğinde sır reçetesinde kullanılan mermer atık tozu oranındaki artışla birlikte standart reçeteye göre sırların beyazlık değerinde bir artış olduğu, bunun yanı sıra kırmızılık ve sarılık değerlerinde de belirgin artış olduğu görülmektedir. Seramik sırlarında renk oluşumu, birçok faktörün etkileşimiyle gerçekleşir. Renk, sırların bileşimi, uygulama yöntemi, pişirme koşulları ve dış faktörler gibi parametrelerden etkilenir [23]. Yapılan çalışmada hazırlanan sırlar aynı uygulama yöntemi ve pişirim koşullarında hazırlandığından sırların bileşimi ve pişirim sürecinde gelişen fazlar açısından renk oluşumunu değerlendirmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır. **Şekil 4**'te verilen faz analizinde sır reçetesinde mermer atık tozu kullanımı ile birlikte özellikle kahverengimsi siyah renk tonu sağlayan magnezyakromit faz miktarının azaldığı görülmektedir. Bu reçetelerde artan mermer atığı kullanımı ile artan beyazlık ve kırmızılık değerlerini açıklamaktadır. Bunun yanı sıra seramik sırlarında kullanılan hammaddelerin saflığı renk oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahipken kirli veya impürite içeren hammaddeler istenmeyen renk değişimlerine yol açabilir. Çalışmada standart sır reçetesi Seger oranı sabit tutularak sır reçeteleri geliştirilmiştir. Bu nedenle kalsit ve dolomit yerine mermer atık tozu artan oranlarda reçeteye ilave edilirken manyezit hammaddesi de artan oranlarda Seger oranının sabit tutmak için sır reçetelerine ilave edilmiştir. **Tablo 1**'de verilen hammaddelere ait kimyasal analizler değerlendirildiğinde mermer atık tozunun oldukça düşük oranda Fe₂O₃ ve TiO₂ içerdiği ancak manyezitin kısmi olarak yerine kullanılan kalsit ve dolomite göre çok daha yüksek oranda Fe₂O₃ içerdiği görülmektedir. Seramik hammaddelerinde bulunan Fe₂O₃ renk verici özellikte olup,

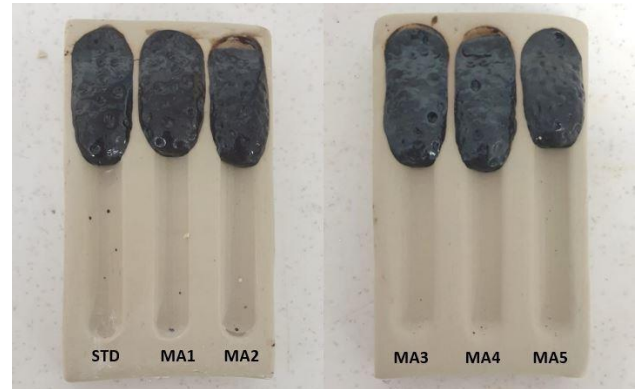
buldukları miktara göre turuncudan kırmızı kahveye doğru bir renklenme meydana getirmektedir [24]. Bu da artan mermer atık tozu ile geliştirilen sır reçetelerindeki artan kırmızılık değerlerini doğrulamaktadır.

Tablo 6. Sırların fiziksel ve optik özellikleri

	STD	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	
Sırlı Mukavemet Değerleri (kg/cm ²)	1095.4	1123.8	1049.1	1090.5	1041.0	1100.4	
L	27.26	29.315	28.87	28.87	28.47	30,385	
Renk Değerleri	a	2.99	4.045	4.025	4.195	4.625	4,705
b	2.64	3.47	3.495	3.275	3.725	5,12	
Sertlik Değerleri	8	8	8	8	8	8	

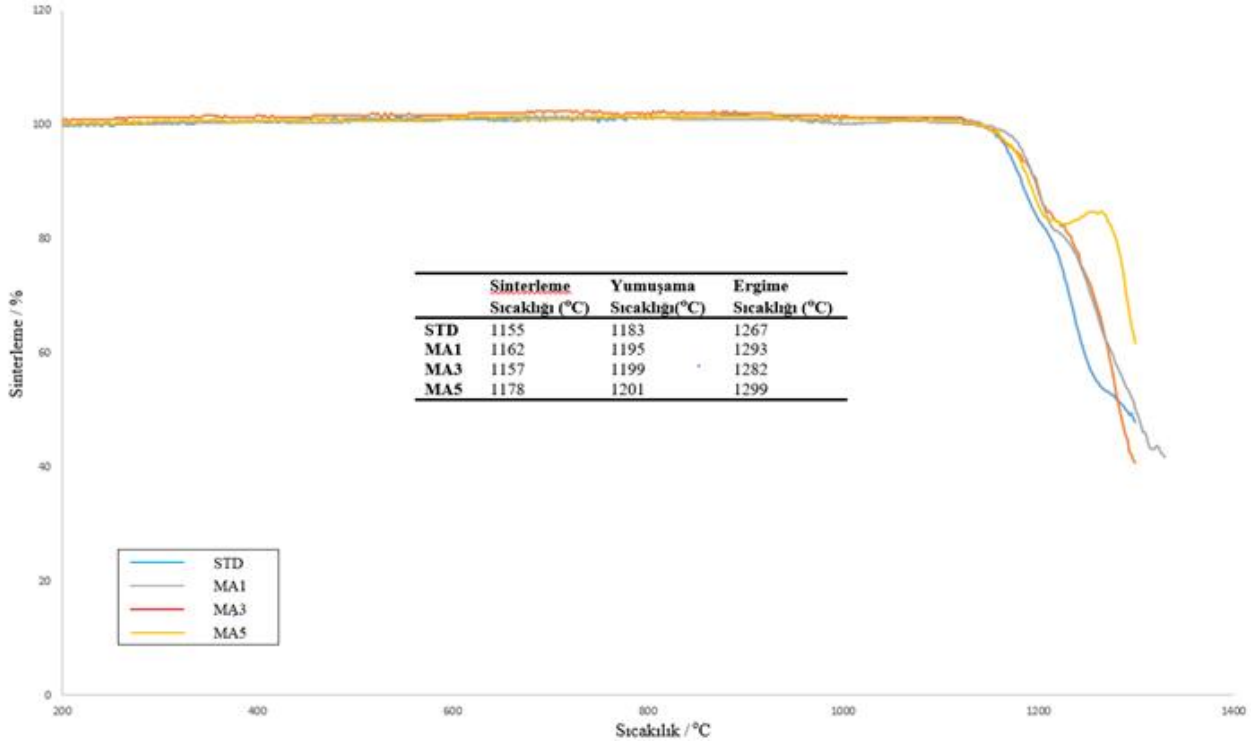
3.3 Isıl davranışın incelenmesi

Sırların 1215°C'de yüksek sıcaklıkta gösterdikleri akma davranışları **Şekil 2**'de görülmektedir. Farklı oranlarda mermer atık ilavesi ile geliştirilen sırların genel olarak standart sır ile benzer akma davranışı gösterdiği görülmektedir. Geliştirilen sırlar içerisinde en yüksek oranda (% 7.96) mermer atık tozu ile hazırlanan MA5 sırlarının akma boyunun diğer sırlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Standart reçetede kalsit ve dolomitin tamamen reçeteden çıkartılması ve alternatif olarak mermer atık tozunun kullanılması sırların akma boyunda azalmaya neden olmuştur.



Şekil 2. Sırların akma boyları

Belirli sır reçeteleri için yapılan ısı mikroskobu analiz sonuçları ve sırlar için belirlenen karakteristik sıcaklık değerleri **Şekil 3**'te verilmiştir. Isı mikroskobu sonuçlarının analizi, mermer atığı ile geliştirilen tüm sır bileşimlerinde standart sır ile benzer ısı özelliklerinin elde edildiğini ortaya koymaktadır. Ancak ısı davranışlarındaki gözle görülür fark, sır reçetesinde mermer atıklarının kullanılmasıyla bağlantılı olarak sinterleme, yumuşama ve ergime sıcaklık değerlerinde gözlenen artıştır. Sır bileşiminde kalsit ve dolomitin mermer atığı ile değiştirilmesi, aynı zamanda reçetelere ilave edilen manyezit geliştirilen sırlarda yumuşama ve ergime sıcaklıklarında artışa neden olmuştur.



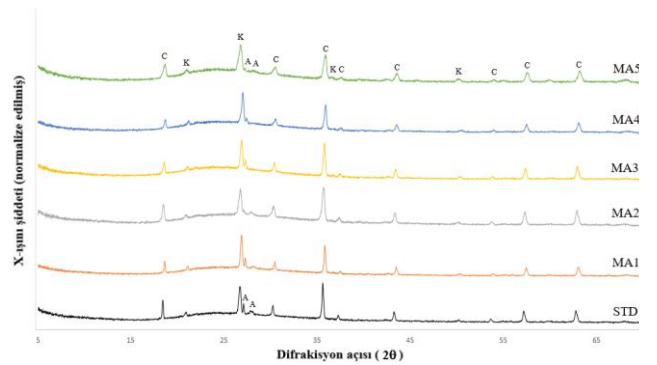
Şekil 3. Standart, MA1, MA3 ve MA5 sırlarına ait ısı mikroskobu analizi sonuçları

Seramik bünyelerde partiküllerin yüksek yüzey enerjisini azaltma yönünde gerçekleşen atomsal hareketlenme sonucunda sinterleme gerçekleşir. Yüzey enerjisi tane boyutuyla ters orantılı olup daha yüksek yüzey enerjisine sahip küçük taneler büyük tanelere göre çok daha hızlı sinterlenmektedir. [25-28]. Bundan dolayı mermer atık tozunun kalsit ve dolomite göre oldukça yüksek olan tane boyutunun geliştirilen sırların ergime davranışını geciktirerek bu sıcaklık artışına neden olduğu düşünülmektedir. Özellikle reçetelerde mermer atık tozu miktarındaki artışla ergime davranışındaki bu değişim daha belirgin şekilde göze çarpmaktadır. Mermer atık tozunun en yüksek oranda kullanıldığı MA5 sırlarının en yüksek yumuşama ve ergime sıcaklıkları değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum MA5 sırlarının akma davranışını da doğrulamaktadır.

3.4 Faz analizi

Standart porselen izolatör sırları ile mermer atık tozu kullanılarak geliştirilen sırlara ait XRD analiz sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Tüm sırların kompozisyonlarında kuvars ve magnezyum kromit fazları ana fazlar olarak benzer şekilde tespit edilmiştir. Kuvars fazı sırların mikroyapısında kalıntı bir faz olarak bulunurken magnezyakromit sırların kompozisyonunda kullanılan renklendirici pigmentin etkisiyle oluşmuştur. Sırlarda gelişen fazlar arasında en belirgin fark anortit ve magnezyakromit fazlarında gözlenmektedir. Standart sırların mikroyapısında anortit fazı belirgin şekilde tespit edilirken sırların kompozisyonlarında kalsit ve dolomit yerine mermer atık tozunun kullanımı ve oranındaki artışla birlikte anortit fazının azaldığı görülmektedir. Kalsit ve dolomitin yerine tamamen mermer

atık tozunun kullanıldığı ve atık oranı en yüksek olan MA5 reçetesinde anortit fazı en düşük oranda tespit edilmiştir. CaO içeren sırlar genellikle kuvars ve anortit, vollastonit gibi Ca-silikat fazlarını içermektedir [29]. Aynı pişirim rejimi ve sırların bileşimi için tane boyutunun azalmasıyla birlikte sırların mikroyapısında kristalleşme artar [30]. Mermer atık tozunun kalsit ve dolomite göre çok daha yüksek olan tane boyutuna bağlı olarak artan oranlarda kullanılan mermer atık tozu sırların mikroyapısında anortit faz gelişimini sınırlandırmıştır. Bununla birlikte magnezyakromit fazına ait pik şiddetleri kıyaslandığında mermer atık tozunun artan oranlarda kullanılmasıyla pik şiddetlerinin yine azaldığı görülmektedir. Mermer atık tozunun magnezyakromit faz gelişimini de azalttığı sonucuna varılabilir.



Şekil 4. Standart sırlar ve mermer atık tozu ile geliştirilen sırlara ait XRD analizleri (K: Kuvars, C: Magnezyakromit, A: Anortit)

4 Sonuçlar

Porselen izolatör sırlarında kalsit ve dolomit yerine mermer tozu atığının kullanımı, hem çevresel hem de teknik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle ülkemizin mermer üretiminin miktarı düşünüldüğünde bu sektörden çıkan atıkların değerlendirilmesi ülkemizin atık politikası için de son derece önemlidir. Teknik olarak değerlendirildiğinde ise mermer atığı esas olarak kalsiyum karbonat ve diğer mineral bileşenler içerdiğinden dolayı son derece kıymetli bir nitelik taşımaktadır. Sahip olduğu bu bileşenlerden dolayı çeşitli endüstriyel alanlarda değerlendirilmeye çalışılmaktadır. Öte yandan elektroporselen sektöründe de tüm seramik sektöründe olduğu gibi artan maliyetler, azalan ham madde kaynakları sektörü alternatif ham madde arayışına yöneltmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde bu çalışma kapsamında yapılan mermer tozunun elektroporselen sırlarında değerlendirilmesi son derece önemlidir.

Bu çalışma kapsamında standart elektroporselen sırası ile aynı Seger oranına sahip alternatif ham maddeler kullanılarak elektroporselen reçeteleri oluşturulmuştur. Oluşturulan reçetelerin standart sır reçetesi ile reolojik olarak benzer olduğu, benzer yoğunluk değerlerinde benzer akma değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Reolojik özelliklere benzer şekilde oluşturulan sır reçeteleri standart sır reçetesine yakın mekanik özellikler göstermiştir. Mukavemet değerleri yakın sonuçlar göstermesi gibi sertlik değerleri de standart sır ile aynı değerdedir. Optik açıdan değerlendirildiğinde ise sır reçetesinde kalsit ve dolomit yerine mermer tozu ve manyezit kullanılması standart elektroporselen sıra kıyasla sır renginde beyazlık, sarılık ve kırmızılık değerlerinde artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Oluşturulan reçetelerin ısıl özellikleri değerlendirildiğinde standart reçetelerde yer alan kalsit ve dolomit yerine mermer tozu ve manyezit kullanılması sırlarda yumuşama ve ergime sıcaklıklarında artışa neden olmuştur. Mermer tozunun tane boyutunun yüksek olması bu artışa neden olmuştur. Akma boyu davranışları değerlendirildiğinde mermer tozunun en fazla olduğu MA5 reçetesinin akma boyunun en kısa olması da tane boyutundan kaynaklı olarak ergime davranışının geciktirdiği sonucunu doğrulamaktadır. Standart sırda ve oluşturulan sır reçetelerinin faz analizleri değerlendirildiğinde kuvars ve magnezyum kromit fazlar ana fazlar olarak benzer şekilde tespit edilmiştir. Faz analizlerinde tespit edilen bir diğer sonuç ise anortit fazındaki değişikliktir. Standart reçetede yer alan kalsit ve dolomit yerine mermer tozunun kullanılması ve oranın artması anortit fazının oluşumunu azaltmıştır. Anortit fazındaki azalmanın sebebinin de mermer tozunun anortit fazının oluşunu azalttığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, mermer atık tozunun kullanımı ile standart sıra benzer teknik özellikler elde edilmiş, yaklaşık % 7 oranında mermer atığının izolatör sırlarında kullanılabilmesi belirlenmiştir. Porselen izolatör sırlarında mermer atığının kullanımı, çevresel, mekanik, kimyasal, ekonomik ve performans açısından birçok fayda sunarak hem sürdürülebilirliği artırır hem de ürün kalitesini geliştirir. Bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları,

mermer atığının potansiyelinin daha iyi değerlendirilmesine olanak sağlayabilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde büyük katkı sağlayan Ankara Seramik Porselen A.Ş. Ar-Ge Merkezi'ne teşekkür ederiz. Merkez, sunduğu değerli kaynaklar ve teknik destek ile araştırmamızın kalitesini artırmış, ilerlemesine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] K. Raju and S. Ravindhar, Detailed review on natural stone materials in architecture. *Materialstoday: Proceedings*. 45(7), 6341-6347, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.842>
- [2] M.B. Baker, The Application of Marble and Granite as Building Materials in Jordan. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 11,234-238, 2017.
- [3] S. Simsek, Mermer atıklarının yapı malzemesi üretiminde kullanım olanakları üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [4] M.C. Limbachiya and J.J. Roberts, 2004. *Construction Demolition Waste*, Thomas Telford Publishing, USA, 2004.
- [5] R.R. Menezes, L.N.L. Santana, G.A. Neves and H.C. Ferreira, Recycling of Mine Wastes as Ceramic RawMaterials: An Alternative to Avoid Environmental, in: *Contamination Environmental Contamination*, 1st edition, InTech, pp. 199-220, 2012.
- [6] J. Xu, M. Yasinzai and B. Lev., *Proceedings of the Sixth International Conference on Management Science and Engineering Management: Focused on Electrical and Information Technology, Part IV: Industrial Engineering*, Springer Science & Business Media, 398, 2012.
- [7] W. Acchar, F.A. Vieira and D. Hotza, Effect of marble and granite sludge in clay materials. *Materials Science and Engineering: A*. 419 (1-2), 306-309, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.021>
- [8] M.A. Montero, M.M. Jordán, M.B. Almendro-Candel, T. Sanfeliu and M.S. Hernández-Crespo, The use of a calcium carbonate residue from the stone industry in manufacturing of ceramic tile bodies. *Appl. Clay Sci*. 43(2), 186-189, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.08.003>
- [9] M.B. Rajgor, N.C. Patel and J. Pitroda, A study on marble waste management: opportunities and challenges in current age for making value added bricks. *Proceedings of National Conference CRDCE13, Vasad.1-9*, 2013.
- [10] P.M. Velasco, M.P.M. Ortíz, M.A.M. Giró and L.M. Velasco, Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review.

- Constr Build Mater. 63, 97-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.045>
- [11] B. Ercikdi, G. Külekci and T. Yılmaz, Utilization of granulated marble wastes and waste bricks as mineral admixture in cemented paste backfill of sulphide-rich tailings. *Construction and Building Materials*. 93, 573-583, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.042>
- [12] W. Shah, M. Nafees and M. Iqbal, Evaluation of marble slurry waste for preparation of commercial grade cement. *Journal of Engineering and Applied Science*. 34(1), 1-8, 2015.
- [13] İ. Büyüksağış, S. Çetintaş ve T. Uygunoğlu, A. Işıtır, Çimento esaslı seramik derz dolgu harcında atık mermer tozlarının kullanımı. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*. 3(1), 66-74, 2016. <https://doi.org/10.31202/ecjse.67166>
- [14] S.D. Kore and A. Vyas, Impact of Marble Waste as Coarse Aggregate on properties of lean cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 4, 85-92, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.01.002>
- [15] G. Marras, A. R. Bortolussi, Peretti and N. Careddu, Characterization methodology for re-using marble slurry in industrial applications. *Energy Procedia*. 125, 656-665, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.277>
- [16] S. Yeşilay, M. Çakı ve R. Ceylantekin, Recycling of Afyon-Iscehisar marble waste in transparent stoneware glaze recipes. *J Aust Ceram Soc*. 53, 475-484, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0057-3>
- [17] S. Yeşilay, Manufacturing of Matte Glaze Compositions by Marble Waste Addition. *The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*. 26(3), 123-131, 2018. <https://doi.org/10.31796/ogummf.412312>
- [18] S.K. Nayak, A. Satapathy and S. Mantry, Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review. *Journal of Building Engineering*, 46,103742, 2022. doi: 10.1016/j.job.2021.103742.
- [19] Ramos JCR, Passalini PGS and Holanda JNF (2023) Utilization of marble waste as a sustainable replacement for calcareous in the manufacture of red-firing wall tiles. *Constr Build Mater*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131115>
- [20] J. Ahmad and Z. Zhou, Development of high strength self compacting concrete with waste glass and waste marble. *Constr BuildMater*. 408,133760, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133760>
- [21] J.S.T. Looms, *Insulators for High Voltages* The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom,1990.
- [22] J. S. Reed, *Principles of Ceramics Processing*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [23] M. Tarhan, B. Tarhan, Development of waterproof engobe layer for ceramic wall tiles. *J Therm Anal Calorim* 140, 555-565, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08893-3>
- [24] M. Tarhan ve B. Tarhan, Sırlı Porselen Karo Üretimi için Alternatif Hammadde Olarak Eşme/Uşak Feldispatı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2), 429-438, 2019.
- [25] R.M. German, P. Suri and S.J. Park, Review liquid phase sintering, *J. Mater. Sci*, 44, 1-39,2009
- [26] B. Tarhan ve M. Tarhan, Utilization of perlite as an alternative raw material in the production of ceramic sanitaryware. *J Therm Anal Calorim*. 147, 3509-3518, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10784-5>
- [27] A. Tiryaki, C. A. Avcı, C. Karakaya, B. Tarhan, Farklı Tane Boyutlarındaki Kuvarsın Elektroporselen Bünyeye Etkisinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 784-793, 2022. <https://doi.org/10.29137/umagd.1110342>
- [28] B. Tarhan ve M. Tarhan, Çanakkale bölgesi alkali kaynağının seramik sağlık gereçleri bünyesi ısıl ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 675-687,2019. <https://doi.org/10.24012/dumf.504331>
- [29] S. Yeşilay, M. Çakı, ve A. Çakır Arianpour, Kalsiyum Oksitin (CaO) Çatlaklı Sır Bileşimlerindeki Etkilerinin Araştırılması, *GMBD*, 4(1), 25-38, 2018.
- [30] B. Yıldız, Effect of particle size distribution on the properties of celsian based glazes. *J Aust Ceram Soc*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s41779-024-01058-y>





Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile yanal yüklü kazıkların statik analizi

Static analysis of laterally loaded piles by complementary functions method

Ahmad Reshad Noori¹ , Zahraa Razzaq Kareem Alhachami² , Bilge Sultan Demirtaş^{3*} ,
Suleiman Ali Suleiman Mohamed Khatrush⁴ 

^{1,2,3,4} İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34310, İstanbul Türkiye

Öz

Bu çalışmada, yanal yüklü kazıkların statik analizi için Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) uygulanmıştır. Olayı idare eden kanonik denklemler, ince çubuk teorisine göre elde edilerek TFY ile başlangıç değer probleminde indirgenmiştir. Kazığın malzemesi izotropik homojen ve kesit geometrik özellikleri ise üniform olarak kabul edilmiştir. Zemin davranışını temsil eden yay modeli lineer ve nonlineer olarak ele alınmıştır. Ele alınan kazık problemleri serbest uçlu ve sabit uçlu olarak çözülerek sınır koşullarının deplasmanlar ve iç kuvvetler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yanal yatak katsayısı değerlerinin ve yatak katsayısı sabitinin kumlu zeminler için alacağı değerlerinin yanal yüklü kazıkların eğilme davranışı üzerindeki etkisi parametrik olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılan araştırmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi, Yanal yüklü kazık, Statik analiz, P-y eğrileri, Kanonik denklemler

1 Giriş

Yanal yüklü kazıklar, mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yapı elemanlarının yük kapasitesi ve statik davranışı çeşitli teknikler yardımıyla hesaplanabilir. Yanal yüklü kazık problemlerinin etkin bir şekilde çözülebilmesi için zeminin mekanik özelliklerine, kazık boyutuna, sınır koşullarına ve uygulanan yükün özelliklerine ihtiyaç vardır. Bu önemli yapı elemanlarının davranışı birçok araştırmacı tarafından hem teorik hem de deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları şöyle özetlenebilir;

Huang vd. [1] inşaat öncesi ve inşaat sonrası CPT ve DMT deneyleri yaparak yanal yüklü kazık gruplarının yapımından sonra zemin özelliklerini nasıl değiştiğini araştırmıştır. Tak Kim vd. [2], Güney Kore'de bulunan Nak-Dong nehrinde kuma gömülü kazıkların yanal yükler altında model testinin sonuçlarını açıklamıştır. Çalışmalarında, yanal yüklü kazıkları için yük deformasyon eğrilerini elde edilmiştir. Wesselink vd. [3] ile Tang ve Yang [4] yanal yüklü kazıkların davranışını deneysel olarak ele almıştır. Fan ve Long [5] kumlu zeminlerde yanal yüklü kazıkların nonlineer analizine üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi uygulamıştır. Achmus [6] eksenel ve yanal yüklemeye

Abstract

In this study, the Complementary Functions Method (CFM) is applied for the static analysis of laterally loaded piles. The canonical equations governing the phenomenon are obtained according to the classic beam theory and simplified to an initial value problem by CFM. The material of the pile is assumed to be isotropic homogeneous and the geometrical properties in the cross-section are considered as uniform. The spring model representing the soil behavior is taken as linear and nonlinear. The effect of boundary conditions on displacements and internal forces are investigated by solving pile problems as free- and fixed-head. The effect of the values of the lateral bearing coefficient and the bearing constant for sandy soils on the flexural behavior of laterally loaded piles is presented parametrically. The obtained results are compared with the results of previous studies and found to be in agreement.

Keywords: Complementary functions method, Laterally loaded pile, Static analysis, P-y curves, Canonical equations

altındaki kazıklar için hesap yaklaşımları ile olası tasarım prosedürlerini özetlemiştir ve periyodik yük etkilerini dikkate almıştır. Kim ve Jeong [7] p-y özelliğini doğrulamak için çeşitli parametrik araştırmalar sunmuştur. Basu vd. [8] uç kısmında yatay bir kuvvete ve bir momente maruz kalan ve çok katmanlı elastik bir ortama yerleştirilen dairesel kazığın davranışını ileri bir yaklaşım ile incelemiştir.

Ekici [9] pasif kazık davranışını etkileyen bazı faktörleri, PLAXIS 3D yazılımı kullanarak üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile araştırmıştır. Heidari vd. [10] ile Khari vd. [11] yanal yüklü kazıkların analizi için genelleştirilmiş periyodik p-y eğrisi modellenmesini ele almıştır. Fatahi vd. [12] yanal zemin yatak katsayısının yanal yüklü kazıkların davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik çalışmalar yapmıştır. Rishitha [13] kumlu ve killi zeminlerde yapılan yanal yüklü kazıklar için ayrı ayrı parametrik çalışmalar yapmıştır. Thieken vd. [14] 250 kazık-zemin sistemiyle yapılan kapsamlı bir parametrik çalışma sonucunda, yeni p-y yaklaşımının, yatay yük taşıma davranışının ve kazık-zemin etkileşimini oldukça gerçekçi bir şekilde tahmin edebildiğini ortaya koymuştur. Lin vd. [15] ile Mayoral vd. [16], rijit yanal yüklü kazıkların zemin-yapı etkileşimini araştırmak için deneysel çalışmalar yapmıştır. Haiderali ve Madabhushi [17] killi zeminde yapılan yanal yüklü kazıklar

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bsdemirtas@gelisim.edu.tr (B.S. Demirtaş)
Geliş / Recieved: 19.12.2023 Kabul / Accepted: 02.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1405338

için p-y eğrilerinin türetilme teknikleri ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

Gupta ve Basu [18], Turello vd. [19] ile Stacul ve Squeglia [20] yanal yüklü kazık problemlerin çözümü için sayısal yöntemler önermiştir. çok katmanlı zeminlerde yanal yüklü kazıkların davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmıştır. Turello vd. [19] yanal yüklü grup kazık sistemlerin analizi için etkin yöntemler önermiştir. Stacul ve Squeglia [20] yanal yüklü kazık problemlerin çözümü için sınır elemanı yöntemini kullanmıştır. Nie vd. [21] Matlock p-y eğrisi yöntemini, açık deniz kazık temellerine uygulamıştır. Rathod vd. [22] yumuşak kildeki statik yanal yüke bağlı eğimlerin p-y eğrileri üzerindeki etkisini incelemiştir. Li vd. [23] çeşitli zemin koşullarında yanal yüklü kazıkların davranışını elde etmiştir ve p-y eğrileri ile karşılaştırmıştır. Baek vd. [24] çeşitli kumlu zemin koşullarında önceden monte edilmiş alüminyum esnek bir kazık üzerinde bir dizi model kazık testi yapılmıştır. Peng vd. [25] eğimli zeminde yanal yüklü kazıkları incelemiştir.

Kardogan vd. [26] 1964 Niigata depremi sırasında hasar gören "Niigata Aile Adliyesi"nin temelindeki iki kazığın sınıvlandırılmış zemindeki eylemsizlik yükleri altındaki davranışlarını araştırmıştır. Yuan vd. [27] yanal yüklü bir kazığın etrafındaki iç zemin davranışının daha iyi anlaşılabilmesine yardımcı olan, tam üç boyutlu yer değiştirme sisteminin zemin-yapı etkileşimini izlemek için uygun olduğunu göstermiştir. Li vd. [28] toplam-yer değiştirme-yüklemeye ile türetilen teorik p-y eğrisinde bu faktörleri dikkate alacak bir çerçeve genişletmiştir. Zhang vd. [29] element seviyesinde laboratuvar ölçek temel zemin davranışına dayanarak, kilde periyodik yüklemeye altında yanal kazık tepkisini analiz etmiştir. Chortis vd. [30] model kazık duvarı boyunca gömülü şekil değiştirme ölçerlerden p-y eğrilerini üretmiştir. Xu vd. [31] tam ölçekli bir saha deneyi yapmıştır ve çeşitli yanal yüklemeye koşullarında kazık davranışını belirlemiştir.

Zdravković vd. [32] PISA çalışmasının bir parçası olarak Cowden'de yapılan orta ölçekli kazık testleri için üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. geliştirilmesini göstermiştir. Liu vd. [33] Matlock ve hiperbolik p-y modellerini kullanan bir p-y eğrisi analiz yöntemi önermiştir. Yuan vd. [34] gerçek zeminin şeffaf olmamasının neden olduğu ölçüm engellerinin üstesinden gelen şeffaf zemin teknolojisini kullanarak yanal yüklü kazık etrafındaki zeminin yer değiştirme alanını görselleştirmiştir. Bhuiyan vd. [35] yanal yüklü büyük çaplı delikli kazıklarda önemli hale gelen düşey yanal kesme kaynaklı momenti ve uç dirençlerini içeren birleşik bir p-y analizini sunmuştur. Çelik [36] kazıkların farklı derinliklerdeki eğrileri, Reese kumu ve sınıvlandırılmış kuma göre çizilen eğrilerle temsil etmiştir. Lalicata vd. [37] şu anda kazıkları tasarlamak için kullanılan yöntemlerin (yani, p-y eğrileri) doymamış zemin reaksiyonunu tanımlamaya çalışırken yetersiz kaldığını göstermiştir ve bu boşluğu doldurmak için ek deneysel ve sayısal araştırmalara ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Bhuiyan vd. [38] Florida Kireçtaşı ve Vuggy Kireçtaşı gibi kaya malzemeleri için mevcut p-y modellerinden bazılarını değerlendirmiştir.

Arvan ve Arockiasamy [39] yanal yüklü kazıkların davranışını doğru bir şekilde tahmin edebilmek için çeşitli parametrik çalışmalar yapmıştır. Pang vd. [40] drenajsız killi zeminlerde eğiminin yanal yüklü kazıkların p-y eğrilerinin başlangıç rijitliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Shi vd. [41] periyodik yüklerin yanal yüklü kazıkların davranışına etkisini incelemiştir.

Diferansiyel denklemlerin sayısal çözümleri için literatürde mevcut olan en etkin yöntemler başlangıç değer problemlerine uygulanabilmektedir. Yanal yüklü kazık probleminin statik davranışını idare eden diferansiyel denklem ise iki noktalı sınır değer problemidir. Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile iki noktalı sınır değer problemlerini başlangıç değer problemlerine indirgeyerek, bu metodların uygulanabilirliğine olanak sağlamaktadır.

Yazarların bilgisine göre yanal yüklü kazıkların TFY ile analiz eden herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Çeşitli mühendislik problemlerinin etkin çözümünde kullanılan TFY [42–46], yanal yüklü kazıkların statik analizinde ilk defa bu çalışmada uygulanmıştır. Bu yöntem ile çözüm yapılırken sadece bilinmeyen fonksiyonun kendisi değil, aynı zamanda türevleri de hesaplanabilir [42–46]. Bu özellik ile yanal yüklü kazık problemlerinin çözümü sırasında yer değiştirmeler ve iç kuvvetler aynı anda hesaplanabilmektedir. Çözüm bölgesinin az sayıda aralığa bölünmesi yeterlidir ve kesin çözümlere oldukça yakın sonuçlar elde edilebilmektedir [42–46]. TFY'nin uygulanabilmesi için kanonik denklemler ince kiriş teorisine dayalı elde edilmiştir. Sınır şartları olarak serbest uçlu ve sabit uçlu kazıklar ele alınmıştır. Zemin parametrelerinin, farklı yüklemeye durumlarının, kazık boylarının ve zemin yanal yay sabitlerinin iç kuvvetler ve yer değiştirmeler üzerindeki etkileri parametrik olarak araştırılmıştır.

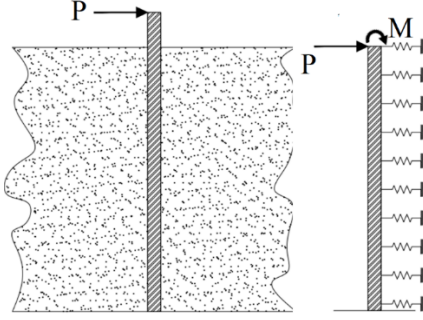
2 Materyal ve metod

Birçok araştırmacı tarafından yanal yüklere maruz kalan düşey kazıklar üzerinde kapsamlı teorik ve deneysel araştırmalar yapılmıştır. Yanal yüklü düşey kazıklar için genelleştirilmiş çözümler Matlock ve Reese [47] tarafından verilmektedir. Yanal yüklere ek olarak düşey yüklerin etkisi Davisson [48] tarafından boyutsuz parametreler açısından değerlendirilmiştir. Broms [49,50] ve Poulos ve Davis [51] yanal yüklü kazık problemlerini çözmek için farklı yaklaşımlar sunmuşlardır. Yanal yüklü bir kazık için diferansiyel denklemi çözenin sonlu farklar yöntemi, bilgisayar olanaklarının mevcut olduğu yerlerde çok fazla kullanılmaktadır. Reese vd. [52] ve Matlock [53] yanal yüklü kazık problemlerini çözmek için (p-y) eğrileri kavramını geliştirmiştir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi zemine gömülü yanal yüklü kazıklar elastik zemine oturan kirişlere benzer. Yanal yüklü kazıklara dış yükler ve momentler yalnızca zemin yüzeyinde veya üstünde uygulanabilir.

Ele alınan yanal yüklü kazıkların davranışını idare eden kanonik denklemler bu bölümde elde edilecektir. Bu amaç ile kazığın eğimi (s), dönme momenti (M) ve kesme kuvveti (V) sırasıyla Denklem (1-3) arasında verilmiştir [54]. Denklemlerde x eksenini kazık aksından geçen eksenini temsil

ederken, kazığın sapması bu eksene dik olan eksen olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Yanal yüklü kazık modeli

$$s = \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2)$$

$$V = EI \frac{d^3y}{dx^3} \quad (3)$$

Burada y kazığın sapmasını, EI kazığın eğilme rijitliğini, E kazığın elastisite modülünü, I ise kazığın atalet momentini [m^4] ifade etmektedir. Kazığın birim uzunluğundaki zemin tepkisinin denklem ise Denklem (4)'te verilmektedir [54].

$$P = EI \frac{d^4y}{dx^4} \quad (4)$$

Kazık aksı boyunca herhangi bir x mesafesindeki zemin tepkisi aynı zamanda aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$P = -E_s \cdot y \quad (5)$$

Burada E_s zeminin elastisite modülüdür. Bu durumda Denklem (4) yeniden düzenlenirse;

$$-E_s \cdot y = EI \frac{d^4y}{dx^4} \quad (6)$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + E_s \cdot y = 0 \quad (7)$$

$$E_s = -\frac{P}{y} \quad (8)$$

$$E_s = N_h \cdot x^n \quad (9)$$

$$E_s = N_h \cdot x \quad (10)$$

(Lineer davranış durumunda $n=1$ olarak alınır.)

Burada N_h yatay yatak modülünün derinliğe bağlı değişim çarpanını [kN/m^3] ve n kullanılan yay modelinin davranışını etkileyen ve zemin türüne göre değişen bir katsayısını ifade eder.

Zemin elastisite modülü olan E_s değeri Denklem (4)'te yerine yazılınca yanal yüklü kazıkların elastik eğri denklemini verecektir:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + N_h \cdot x^n \cdot y = 0 \quad (11)$$

TFY'nin uygulanabilmesi için elde edilen bu denklemin, TFY'nin uygulanabilmesi için 4. Mertebeden olan denklem (11)'in, 4 adet kanonik denklem formunda elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, yanal yüklü kazıkların kanonik denklemleri ilk defa elde edilmiştir.

Denklem (16-19)'de verilen kanonik denklemlerde, Z_1 yanal deplasman, Z_2 dönme, Z_3 eğilme momenti ve Z_4 ise kesme kuvvetini göstermektedir.

$$y = Z_1 \quad (12)$$

$$y' = Z_2 \quad (13)$$

$$y'' = Z_3 \quad (14)$$

$$y''' = Z_4 \quad (15)$$

$$Z'_1 = Z_2 \quad (16)$$

$$Z'_2 = Z_3 \quad (17)$$

$$Z'_4 = Z_3 \quad (18)$$

$$Z'_4 = -Z_{1*} N_h \cdot x^n / EI \quad (19)$$

Yukarıdaki denklemlerde, S dönmeyi, y yanal yer değiştirmeyi, M eğilme momentini, E kazığın elastisite modülünü, I kazığın atalet momentini [m^4], E_s zemin elastisite modülünü, N_h yatay yatak modülünün derinliğe bağlı değişim çarpanını [kN/m^3] ve n kullanılan yay modelinin davranışını etkileyen ve zemin türüne göre değişen bir katsayısını ifade eder.

Yukarıda verilen 4 adet kanonik diferansiyel denklemin (Denklem (16-19)) çözülebilmesi için 4 adet sınır şartı gerekmektedir. Bu sınır şartları kazığın yükleme ve mesnet türüne göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada ele alınan sınır şartları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Sınır koşulları

Sınır koşulu	Yükleme Durumu	Kazığın en üst noktası ($x = 0$)	Kazığın en alt noktası ($x = L$)
Serbest uçlu	Yanal yük (P) ve moment (M)	$Z_3 = M/EI$ $Z_4 = P/EI$	$Z_1 = 0$ $Z_2 = 0$
Sabit uçlu	Yanal yük (P)	$Z_2 = 0$ $Z_4 = P/EI$	$Z_1 = 0$ $Z_2 = 0$

Bu bölümde geometrisi ve özellikleri esken eksen boyunca üniform yanal yüklü kazık problemlerinin davranışını yanal yer değiştirmesini idare eden diferansiyel denklemlerin çözümüne için TFY uygulanmıştır. TFY ile çözüm yapılırken yer değiştirmeler ile birlikte kesit tesirleri de aynı anda elde edilmektedir. Bu metod ile sınır değer problemleri başlangıç değer problemine dönüştürülmektedir. Fortran dilinde bilgisayar program yazılmıştır. Hazırlanan program yardımıyla analizlerde 5. Mertebe Runge-Kutta (RK5) metodu uygulanmıştır. Birinci mertebeden 4 adet diferansiyel denklem çözülecektir. Bu denklemler matris formunda yazılırsa;

$$d \frac{\{y(x)\}}{dx} = [A(x)]_{4 \times n} [Y(x)]_{4 \times 1} + [F(x)]_{4 \times 1} \quad (20)$$

Burada x bağımsız değişken, {y} bilinmeyen değişkenleri içeren matris, [A] geçiş matrisi, {F} yüklem matrisidir.

Sınır şartından 2 adeti başlangıçta 2 adeti ise çözüm bölgesi sonundadır

$$\sum_j^4 =_1 b_{ij} y_j(a) = \alpha_i \quad (i= 1, \dots, 2) \quad (21)$$

$$\sum_j^4 =_1 d_{ij} y_j(b) = \beta_i \quad (i=1, \dots, 2) \quad (22)$$

Özay Yanal yüklü kazıkların yatay yer değiştirmesini idare eden diferansiyel denklemin çözümü şöyle olur.

$$\{Y(x)\} = \sum_m^4 =_1 C_m \left(U^{(m)}(x) \right) + \{V(x)\} \quad (23)$$

Cm sabitleri sınır şart ile hesaplanır. $U^{(m)}(x)$ Homojen homojen çözüm olup çözüm 4 adet homojen sınır şartının elde özel homojen çözümdür. yardımıyla elde edilmektedir.

$$[U(x)]_{4 \times n} = [\{U^{(1)}(x)\}_{4 \times 1}, \{U^{(2)}(x)\}_{4 \times 1}, \dots, \{U^{(m)}(x)\}_{4 \times 1}] \quad (24)$$

Böylece,

$$\{Y(x)\} = [U(x)] \{C\} + \{V(x)\} \quad (25)$$

İntegrasyon sabitleri bulunduktan sonra, çözüm bölgesinde istenilen yerdeki bağımlı değişkenlerin değerleri kolaylıkla Denklem (26) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\frac{d\{U^4(x)\}}{dx} = [A]\{U^4(x)\} \quad (26)$$

Bu denklem ile homojen çözüm bulunur.

$\{U^{(m)}(x)\}$, {U} bilinmeyen vektörünün çözüm bölgesi başlangıcında m'inci elemanına 1, diğerlerine 0 olması durumunda elde edilen çözüm demektir (Tablo 2).

Tablo 2. TFY tablosu

m=1	m=2	m=3	m=4
U ₁ (a)=1	U ₂ (a)=0	U ₃ (a)=0	U ₄ (a)=0
U ₁ (a)=0	U ₂ (a)=1	U ₃ (a)=1	U ₄ (a)=0
....
U ₁ (a)=0	U ₂ (a)=0	U ₃ (a)=0	U ₄ (a)=1

Böylece bu şekilde elde edilmiş olan [U] kare matrisinin, çözüm bölgesi başlangıcındaki değerleri birim matrise karşılık gelmektedir.

$$[U(a)] = [I] \quad (27)$$

Özel çözümün elde edilmesi

$$\frac{d\{V(x)\}}{dx} = [A]\{V(x)\} + \{F(x)\} \quad (28)$$

Denklem (23)'te verilen genel denklemin homojen çözümü Denklem (29)'da verilmiş olup sınır şartları ile bir defa çözülmesi yeterlidir.

$$\{V(a)\} = \{0\} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} m=4 \\ V_1(a)=0 \\ V_2(a)=0 \\ \dots \\ \dots \\ V_n(a)=0 \end{aligned}$$

3 Bulgular ve tartışma

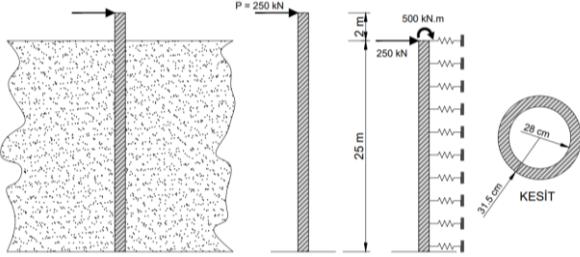
Bu bölümün ilk aşamasında, TFY ile elde edilen sonuçların doğrulanması gerekmektedir. Bu amaç ile Murthy [54] tarafından çözülen üç örnek için sonuçlar TFY ile de elde edilerek Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. Murthy [54]'te yer alan örneklerde ele alınan kazığın dış çapı 61 cm, cidar kalınlığı 2.5 cm, derinliği ise 20 m olup çelikten yapıldığı kabul edilmiştir. N_h değeri 6 MN/m³ ve n katsayısı ise 1 olarak alınmıştır. Kazığa etki eden yanal yükün değeri ise 268 kN'dir. Serbest uçlu (yanal yüklü + moment) durumunda ise yanal yükün kazığa yerden iki metre yukarıdan etki ettiği varsayılmıştır.

Çözülen örnekler ile ilgili detaylar ilgili kaynak kitabında bulunmaktadır. Burada sadece sonuçların sunulması yeterli görülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında (Tablo 3) TFY sonuçlarının Murthy [54] ile uyumlu olduğu görülmektedir.

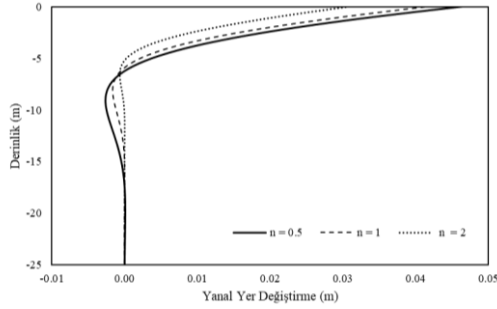
Tablo 3. Yanal yer değiştirmelerini karşılaştırılması

Kazık tipi	Murthy [54]	TFY
Serbest uçlu	1.94 cm	1.9385 cm
Sadece yanal yüklü		
Serbest uçlu	3.09 cm	3.0873 cm
Yanal yüklü + Moment		
Sabit uclu	0.75 cm	0.7498 cm
Sadece yanal yüklü		

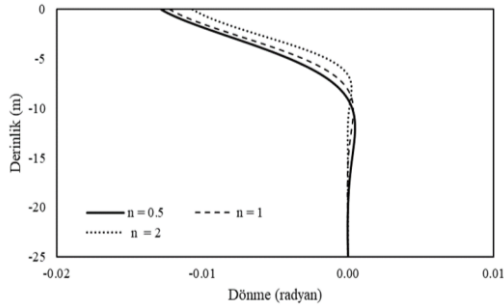
Önerilen metot doğrulandıktan sonra geometrik özellikleri Şekil 2’de verilen serbest uçlu kazık probleminin $n=0.5$, $n=1$ ve $n=2$ ile $N_h=3 \text{ MN/m}^3$ değerleri için statik analiz sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen yer değiştirme değerleri Şekil 3’te, dönme değerleri Şekil 4’te, eğilme momenti değerleri Şekil 5’te ve kesme kuvveti sonuçları ise Şekil 6’da sunulmuştur.



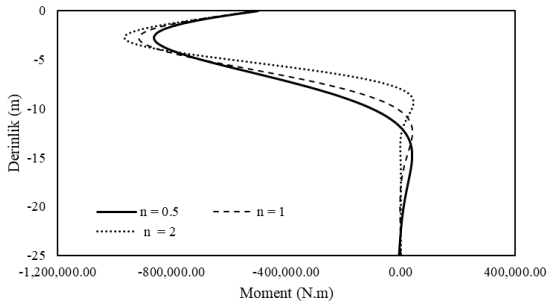
Şekil 2. Yanal yük etkisindeki serbest uçlu kazık



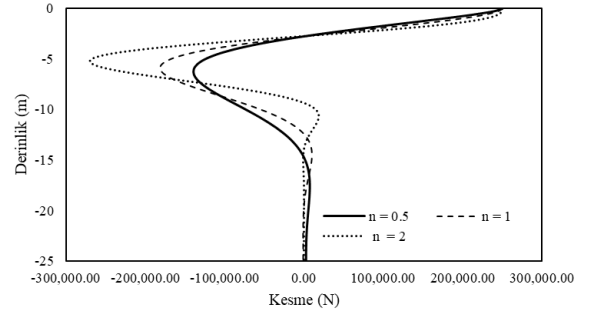
Şekil 3. Serbest uçlu kazık için elde edilen yer değiştirme değerleri ($N_h=3 \text{ MN/m}^3$)



Şekil 4. Serbest uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ($N_h=3 \text{ MN/m}^3$)

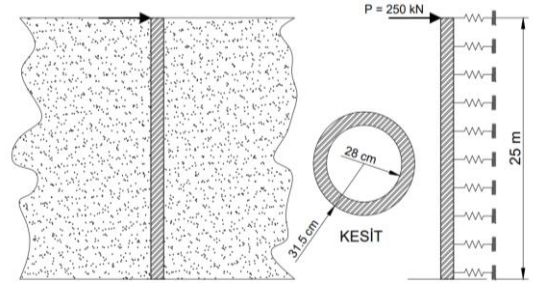


Şekil 5. Serbest uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri ($N_h=3 \text{ MN/m}^3$)

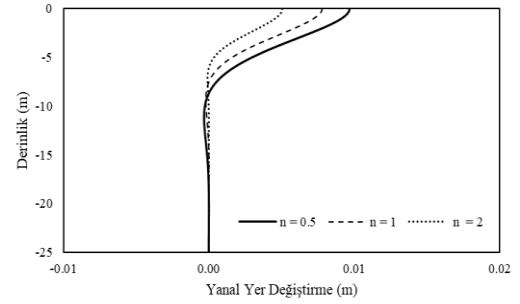


Şekil 6. Serbest uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri ($N_h=3 \text{ MN/m}^3$)

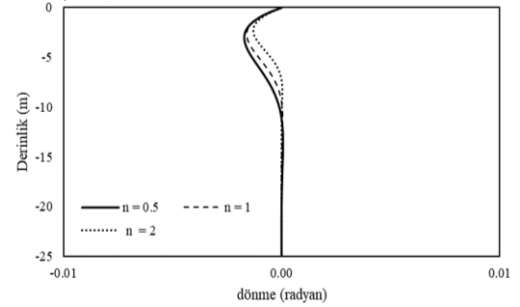
İkinci örnek olarak $n=0.5$, $n=1$ ve $n=2$ ile $N_h=5 \text{ MN/m}^3$ değerleri için Şekil 7’de verilen sabit uçlu kazık ele alınacaktır. Ele alınan bu yanal yüklü kazık için elde edilen yanal yer değiştirme, dönme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerinin derinlik ile değişimi Şekil (8-11)’da çizilmiştir.



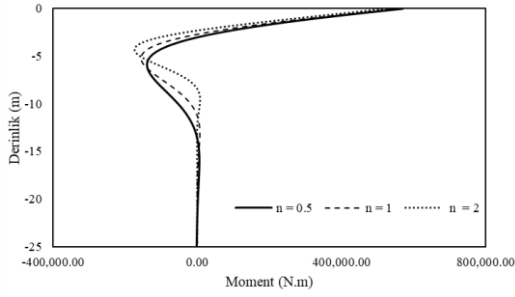
Şekil 7. Yanal yük etkisindeki sabit uçlu kazık



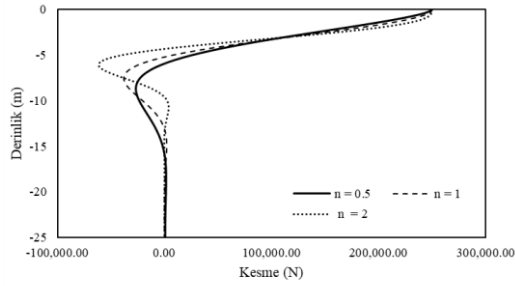
Şekil 8. Sabit uçlu kazık için elde edilen yer değiştirme değerleri ($N_h=5 \text{ MN/m}^3$)



Şekil 9. Sabit uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ($N_h=5 \text{ MN/m}^3$)



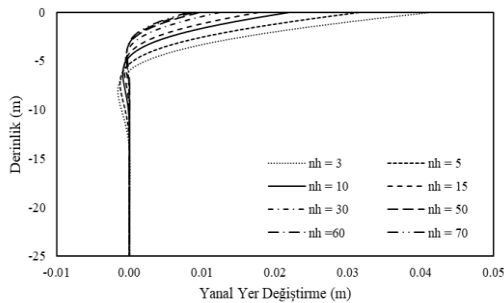
Şekil 10. Sabit uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri ($N_h = 5 \text{ MN/m}^3$)



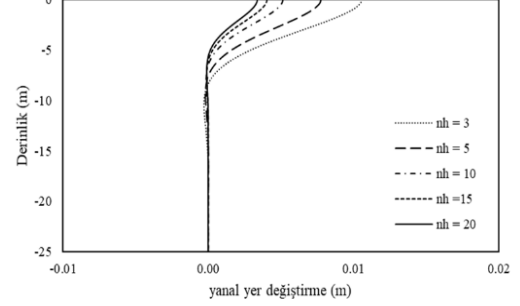
Şekil 11. Sabit uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri ($N_h = 5 \text{ MN/m}^3$)

Şekil (3-4) ve Şekil (8-9) incelendiğinde $L=25$ metre bir kazık için $n=0.5$ parametresine ait yer değiştirme ve dönme değerlerinin $n=1$ ve $n=2$ parametresine göre daha büyük olduğu görülmektedir, $n=2$ durumunda ise yer değiştirmeler ve dönmeler en küçük değerleri almaktadır. Benzer şekilde $n=0.5$ değeri için eğrilerden eğim değişiminin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Şekil (5-6)'da ve Şekil (10-11)'de ise n değerinin artmasıyla eğilme momentinin ve kesme kuvvetinin de arttığı gözlemlenmiştir.

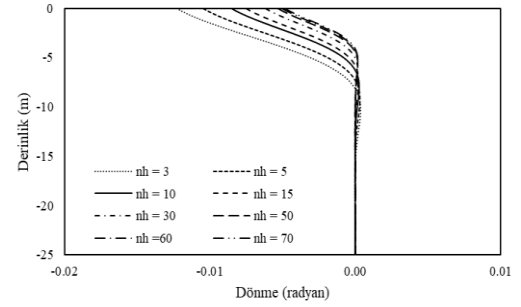
Üçüncü olarak N_h değerlerinin statik davranışa etkisi serbest uçlu (Şekil 2) ve sabit uçlu (Şekil 7) kazıklar için TFY ile araştırılmıştır. Farklı N_h değerleri için elde edilen yanıl yer değiştirme değerleri Şekil (12-13)'te, dönme değerleri Şekil (14-15)'te, eğilme momenti değerleri Şekil (16-17)'de ve kesme kuvveti değerleri ise Şekil (18-19)'da grafik formunda çizilmiştir.



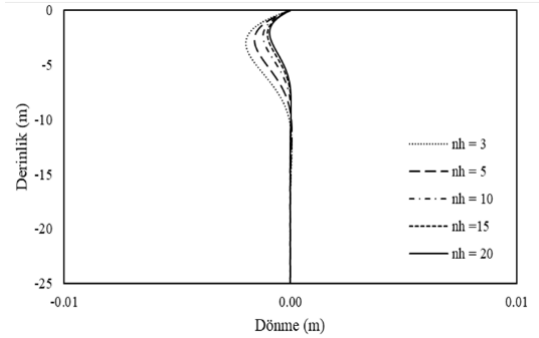
Şekil 12. Serbest uçlu kazık için elde edilen yanıl yer değiştirme değerleri ($n=1$)



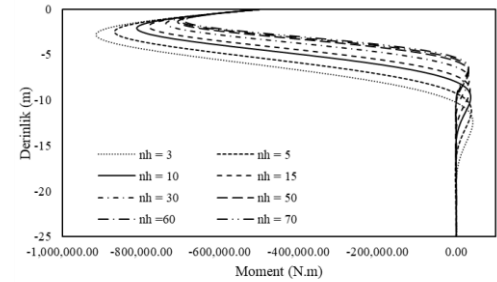
Şekil 13. Sabit uçlu kazık için elde edilen yanıl yer değiştirme değerleri ($n=1$)



Şekil 14. Serbest uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ($n=1$)



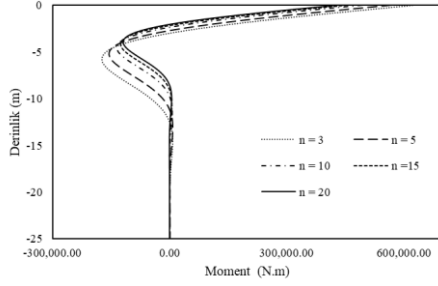
Şekil 15. Sabit uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ($n=1$)



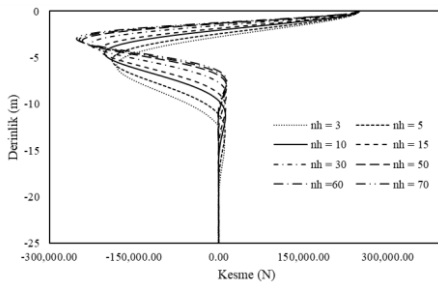
Şekil 16. Serbest uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri ($n=1$)

Şekil (12-15) incelendiğinde N_h değerinin yüksek olduğu (sıklığın artması) durumlarda yanıl yer değiştirme ve dönme değerlerinin küçük olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın Şekil (16-17)'den de görüldüğü gibi düşük N_h değerleri

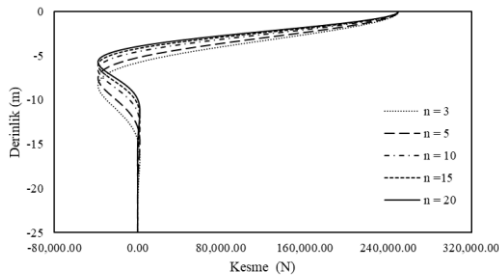
zeminlerde eğilme momenti değerlerinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 17. Sabit uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri (n=1)



Şekil 18. Serbest uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri (n=1)



Şekil 19. Sabit uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri (n=1)

Şekil (18-19)'dan N_h değerleri arttıkça kesme kuvveti değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ele alınan problemler ilgili parametrik çalışmaların sayıları artırabilir ve çeşitli sonuçlar sunulabilir (bkz. Alhachami [55]).

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, yanal yüklerin etkisinde olan kazıkların statik analizi için etkin bir sayısal yöntem uygulanmıştır. Bu yapı elemanlarının statik yükler altındaki davranışını idare eden temel denklemler özetlenmiş, kanonik formda elde edilen dördüncü mertebeden adi diferansiyel denklem takımlarının çözümleri Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile yapılmıştır. Yöntemin sonuçlarının doğruluğu gösterildikten sonra lineer ve lineer olmayan zemin yay parametre için birtakım parametrik çalışmalar sunulmuştur. Ele alınan kazıklar serbest uçlu ve sabit uçlu olarak çözülmüştür. Bu araştırmanın en önemli sonuçları şöyle özetlenebilir:

• Kazıklar için en büyük yer değiştirme değerleri en düşük n parametresinde olduğu görülmüştür. Ayrıca N_h değeri ile kazıkların yanal yer değiştirme değerlerinin ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

• Dönme değerleri karşılaştırıldığında ise, yanal yer değiştirme değerlerine benzer bir durum olduğu görülmüştür. Şöyle ki, düşük n değerleri için dönme değerlerinin daha büyük olduğu ve yüksek N_h değerleri için dönme değerlerinin daha küçük olduğu gösterilmiştir.

• Eğilme momenti değerleri incelendiğinde; Yüksek n değerleri için eğilme momentlerinin de yüksek olduğu gösterilmiştir. Ancak, N_h değerinin artmasıyla eğilme momenti değerlerinin düştüğü görülmüştür.

• Kesme kuvveti değerlerine bakıldığında; yüksek n ve N_h değerleri için kesme kuvveti değerlerinin de yüksek olduğu ortaya çıkmıştır.

• Daha önce çeşitli mühendislik mekaniği problemlerine etkin bir şekilde uygulanan TFY'nin geoteknik mühendisliği alanındaki iki noktalı sınır değer problemlerine de etkin bir şekilde uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Çıkar çatışması (

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] A. B. Huang, C. K. Hsueh, M. W. O'Neill, S. Chern and C. Chen, Effects of construction on laterally loaded pile groups. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(5), 385-397, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:5\(385\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:5(385)).
- [2] B. Tak Kim, N. K. Kim, W. Jin Lee and Y. Su Kim, Experimental load transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(4), 416-425, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2004\)130:4\(416\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2004)130:4(416)).
- [3] B. D. Wessellink, J. D. Murff, M. F. Randolph, I. L. Nunez and A. M. Hyden, Analysis of centrifuge model test data from laterally loaded piles in calcareous sand. Engineering for Calcareous Sediments, 261-270, 1988. <https://doi.org/10.1201/9781003211433-35>.
- [4] X. Tang and M. Yang, Analysis of laterally-loaded piles in weathered rock slopes based on p-y curve method. International Journal of Geotechnical Engineering, 14(7), 809-819, 2020. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1498199>.
- [5] C.C. Fan and J. H. Long, Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand. Computers and Geotechnics, 32(4), 274-289, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.02.004>.
- [6] M. Achmus, Design of axially and laterally loaded piles for the support of offshore wind energy converters. Proceedings of the Indian Geotechnical Conference GEOTrendz-2010, pp. 16-18, Mumbai, India, 2010.
- [7] Y. Kim and S. Jeong, Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction.

- Computers and Geotechnics, 38(2), 248-257, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.12.001>.
- [8] D. Basu, R. Salgado and M. Prezzi, A new model for analysis of laterally loaded piles. *Geo-Frontiers 2011*, American Society of Civil Engineers, 122-131, Reston, VA, 2011. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)14](https://doi.org/10.1061/41165(397)14).
- [9] A. Ekici, Three dimensional finite element modeling for the laterally loaded passive pile behavior. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2013.
- [10] M. Heidari, H. El Naggar, M. Jahanandish and A. Ghahramani, Generalized cyclic p-y curve modeling for analysis of laterally loaded piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, 138-149, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.04.001>.
- [11] M. Khari, K.A. Kassim and A. Adnan, Development of p-y curves of laterally loaded piles in cohesionless soil. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-8, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/917174>.
- [12] B. Fatahi, S. Basack, P. Ryan, W. H. Zhou and H. Khabbaz, Performance of laterally loaded piles considering soil and interface parameters. *Geomechanics and Engineering*, 7(5), 495-524, 2014. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.5.495>.
- [13] A. L. Rishitha, Numerical modelling of laterally loaded single pile. Ph.D. Thesis, Indian Institute of Technology Hyderabad, Telangana, India, 2015.
- [14] K. Thieken, M. Achmus and K. Lemke, A new static p-y approach for piles with arbitrary dimensions in sand. *Geotechnik*, 38(4), 267-288, 2015. <https://doi.org/10.1002/gete.201400036>.
- [15] H. Lin, L. Ni, M. T. Suleiman and A. Raich, Interaction between laterally loaded pile and surrounding soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(4), 04014119, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001259](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001259).
- [16] J. M. Mayoral, J. M. Pestana and R. B. Seed, Multi-directional cyclic p-y curves for soft clays. *Ocean Engineering*, 115, 1-18, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.01.033>.
- [17] A. E. Haiderali and G. Madabhushi, Evaluation of curve fitting techniques in deriving p-y curves for laterally loaded piles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(5), 1453-1473, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0054-2>.
- [18] B. K. Gupta and D. Basu, Analysis of laterally loaded short and long piles in multilayered heterogeneous elastic soil. *Soils and Foundations*, 57(1), 92-110, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.01.007>.
- [19] D. F. Turello, F. Pinto and P. J. Sánchez, Analysis of lateral loading of pile groups using embedded beam elements with interaction surface. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43(1), 272-292, 2019. <https://doi.org/10.1002/nag.2863>.
- [20] S. Stacul and N. Squeglia, Analysis method for laterally loaded pile groups using an advanced modeling of reinforced concrete sections. *Materials*. 11(2), 300, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11020300>.
- [21] S. Nie, X. Zou and Q. He, A modified p-y curve method for offshore pile foundations under cyclic lateral loading in soft clay. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering*, 485-496 Singapore, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6632-0_37.
- [22] D. Rathod, K. Muthukkumaran and T. G. Sitharam, Effect of slope on p-y curves for laterally loaded piles in soft clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(3), 1509-1524, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0405-7>.
- [23] H. Li, L. Tong, S. Liu, H. Liu and M. Zhang, Construction and verification of a unified p-y curve for laterally loaded piles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(3), 987-997, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1111-7>.
- [24] S. H. Baek, J. Kim, S. H. Lee and C. K. Chung, Development of the cyclic p-y curve for a single pile in sandy soil. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(3), 351-359, 2018. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1318986>.
- [25] W. Peng, M. Zhao, Y. Xiao, C. Yang and H. Zhao, Analysis of laterally loaded piles in sloping ground using a modified strain wedge model. *Computers and Geotechnics*, 107, 163-175, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.007>.
- [26] P. S. O. Kardogan, N. S. Isik, M. I. Onur and S. Bhattacharya, A study on the laterally loaded pile behaviour in liquefied soil using p-y method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471, 042015, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/4/042015>.
- [27] B. Yuan, M. Sun, Y. Wang, L. Zhai, Q. Luo and X. Zhang, Full 3D displacement measuring system for 3d displacement field of soil around a laterally loaded pile in transparent soil. *International Journal of Geomechanics*, 19(5), 04019028, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.19435622.0001409](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.19435622.0001409).
- [28] S. Li, J. Yu, M. Huang and C. F. Leung, Application of T-EMSD based p-y curves in the three-dimensional analysis of laterally loaded pile in undrained clay. *Ocean Engineering*, 206, 107256, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107256>.
- [29] Y. Zhang, K. H. Andersen and P. Jeanjean, Verification of a framework for cyclic p-y curves in clay by hindcast of Sabine River, SOLCYP and centrifuge laterally loaded pile tests. *Applied Ocean Research*, 97, 102085, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102085>.
- [30] G. Chortis, A. Askarinejad, L. J. Prendergast, Q. Li and K. Gavin, Influence of scour depth and type on p-y curves for monopiles in sand under monotonic lateral loading in a geotechnical centrifuge. *Ocean Engineering*, 197, 106838, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106838>.
- [31] D. Xu, X. Xu, W. Li and B. Fatahi, Field experiments on laterally loaded piles for an offshore wind farm. *Marine Structures*. 69, 102684, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102684>.


- [32] L. Zdravković, D. M. G. Taborda, D. M. Potts, D. Abadias, H. J. Burd, B. W. Byrne, K. G. Gavin, G. T. Houlsby, R. J. Jardine, C. M. Martin, R. A. McAdam and E. Ushev, Finite-element modelling of laterally loaded piles in a stiff glacial clay till at Cowden. *Geotechnique*, 70(11), 999-1013, 2020. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.PISA.005>.
- [33] X. Liu, G. Cai, L. Liu, S. Liu, W. Duan and A. J. Puppala, Improved p-y curve models for large diameter and super-long cast-in-place piles using piezocone penetration test data. *Computers and Geotechnics*, 130, 103911, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103911>.
- [34] B. Yuan, Z. Li, Z. Zhao, H. Ni, Z. Su and Z. Li, Experimental study of displacement field of layered soils surrounding laterally loaded pile based on transparent soil. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 3072-3083, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03004-y>
- [35] F. M. Bhuiyan, R. Motamed, R. V. Siddharthan and D. H. Sanders, Evaluation of a unified p-y method for lateral analysis of large-diameter drilled shafts using NVShaft. *Transportation Geotechnics*, 36, 100813, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100813>.
- [36] F. Çelik, A comparative analytical investigation on the effects of different p-y curves for a laterally loaded single pile design in saturated sandy soil. *European Journal of Science and Technology* (34), 474-478, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1082906>.
- [37] L. M. Lalicata, G. M. Rotisciani, A. Desideri and F. Casini, A numerical model to study the response of piles under lateral loading in unsaturated soils. *Geosciences*, 12(1), 1, 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010001>.
- [38] F. M. Bhuiyan, R. V. Siddharthan and R. Motamed, Evaluation of existing p-y models for caliche based on numerical analysis of raiders stadium lateral load tests. DFI 47th Annual Conference on Deep Foundations, pp. 297-309, National Harbor, Maryland, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7187512>.
- [39] P. A. Arvan and M. Arockiasamy, Energy-based approach: analysis of a laterally loaded pile in multi-layered non-linear elastic soil strata. *Geotechnics*, 570-598, 2(3), 570-598, 2022. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2030028>.
- [40] L. Pang, C. Jiang and L. Chen, Nonlinear predictive framework of the undrained clay slope effect on the initial stiffness of p-y curves of laterally loaded piles by FEM. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1684, 2022. <https://doi.org/10.3390/jmse10111684>.
- [41] Z. Shi, L. Liu, M. Huang, K. Shen and B. Wang, Simulation of cyclic laterally-loaded piles in undrained clays accounting for soil small-strain characteristics. *Ocean Engineering*, 267, 113268, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113268>.
- [42] B. Temel, F. F. Çalim and N. Tütüncü, Quasi-static and dynamic response of viscoelastic helical rods. *Journal of Sound and Vibration*, 271(3-5), 921-935, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00760-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00760-0).
- [43] A. R. Noori, B. Temel, On the vibration analysis of laminated composite parabolic arches with variable cross-section of various ply stacking sequences. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(19), 1658-1672, 2020. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1524949>.
- [44] T. A. Aslan, A. R. Noori ve B. Temel, Çift yönlü fonksiyonel derecelenmiş malzemeli timoshenko kirişlerinin serbest titreşim analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(3), 30-36, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.621183>.
- [45] S. Yildirim, Free vibration analysis of sandwich beams with functionally-graded-cores by complementary functions method. *AIAA Journal*, 58(12), 5431-5439, 2020. <https://doi.org/10.2514/1.J059587>.
- [46] H. Rasooli, A. R. Noori and B. Temel, On the static analysis of laminated composite frames having variable cross section. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(5), 258, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02973-y>.
- [47] H. Matlock and L. C. Reese, Generalized solutions for laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 86(5), 63-92, 1960. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000303>.
- [48] M. T. Davisson, Behavior of flexible vertical piles subjected to moments, shear and axial load. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Illinois, USA, 1960.
- [49] B. B. Broms, Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(2), 27-63, 1964. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000611>.
- [50] B. B. Broms, Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(3), 123-156, 1964. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000614>.
- [51] H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*. Wiley, 1990.
- [52] L. C. Reese, W. R. Cox and F. D. Koop, Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference*, pp. 473-480, Houston, Texas, 1974. <https://doi.org/10.4043/2080-MS>.
- [53] H. Matlock, Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay. *Offshore Technology Conference*, pp. 577-588, Houston, Texas, 1970. <https://doi.org/10.4043/1204-MS>
- [54] V. N. S. Murthy, *Geotechnical Engineering- Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Taylor & Francis, 2003.
- [55] Z. R. K., Alhachami, Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi ile Yanal Yüklü Kazıkların Statik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, 2023.





Konya ili tarım topraklarında mikroplastik kirlilik yükünün araştırılması

Investigation of microplastic pollution load in agricultural soils of Konya province

Senar Aydın¹ , Arzu Ulvi² , Fatma Bedük^{3,*} , Mehmet Emin Aydın⁴ 

^{1,2,3} Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Köyceğiz Kampüsü, 42090, Meram, Konya, Türkiye

⁴ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Köyceğiz Kampüsü, 42090, Meram, Konya, Türkiye

Öz

Toprak ortamında giderek artan mikroplastik (MP) kirliliği büyük endişe kaynağıdır. Bu çalışmada Konya İli ve yakın çevresinden rastgele seçilmiş olan 20 noktada, 0-20 cm derinlikten alınan toprak örneklerinde mikroplastik miktarı, renkleri ve morfolojileri tespit edilmiştir. Topraklarda mikroplastik kirliliğinin risk seviyesi, kirlilik faktörü (CF) ve kirlilik yük endeksi (PLI) değerleri ile belirlenmiştir. Çalışma sonucunda toprak örneklerinde 80-340 MP/kg arasında MP tespit edilmiştir. Numunelerde %45 fiber (1300 MP); %25 pellet (720 MP) tespit edilirken %51 oranla en fazla şeffaf renkli mikroplastığe rastlanmıştır. Üç örnekleme noktasında CF değerinin önemli ekolojik risk ($3 \leq CF < 6$) oluşturduğu, diğer numuneler için orta seviyede ($1 \leq CF < 3$) ekolojik risk olduğu tespit edilmiştir. PLI değerine göre numunelerin tümü için düşük risk ($PLI < 10$) olduğu tespit edilmiştir. Toprak pH, EC ve organik madde muhtevası ile mikroplastik sayıları arasında anlamlı bir korelasyon tespit edilmezken, fosfor ile orta düzeyli ($r=0.56$), potasyum ile zayıf düzeyli ($r=0.36$) korelasyon tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikroplastik, Tarım, Toprak, Risk.

1 Giriş

Plastik ürünler güçlü plastisite, maliyet performansı ve uzun dayanıklılık avantajı gibi nedenlerle tarımsal üretim, endüstriyel imalat, ilaç sektörü, gıda ambalajı ve diğer pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bu plastikler farklı yollarla çevreye salınmakta ve çevresel ortamlarda düşük geri dönüşüm oranları ve uzun dayanımları sebebiyle birikmektedirler. Birçok ülkede atıkların geri dönüşümü %50'ye ulaşmamaktadır. 1950 ile 2015 yılları arasında küresel olarak yaklaşık 63×10^8 ton plastik çöp üretildiği ve bunun yaklaşık 8×10^8 tonunun yakıldığı, 49×10^8 tonunun ise doğrudan veya yakılarak doğal çevreye verildiği, yalnızca 6×10^8 ton atığın geri dönüştürüldüğü tahmin edilmektedir [1].

Mikroplastik (MP) kavramı ilk olarak 2004 yılında deniz ortamındaki çapı 5 mm'den küçük plastik parçacıkları tanımlamak için kullanılmıştır [2]. Mikroplastik kirliliğine ilişkin çalışmalar deniz ortamında başlamış ve çoğunlukla su ortamına odaklanılmış, toprak ortamında ise çalışmalar nispeten daha geç başlamıştır. 2012 yılında Rilling [3]

Abstract

Increasing microplastic (MP) pollution in the soil is of great concern. In this study, microplastic amount, colors and morphologies were determined in soil samples taken from 0-20 cm depth at 20 randomly selected points in Konya Province and its vicinity. The risk level of microplastic pollution in soils was determined by pollution factor (CF) and pollution load index (PLI) values. As a result of the study, MP was detected between 80-340 MP/kg in soil samples. While 45% fiber (1300 MP); 25% pellet (720 MP) was detected in the samples, transparent colored microplastic was encountered the most with 51% rate. It was determined that the CF value constituted a significant ecological risk ($3 \leq CF < 6$) in three sampling points and that there was a moderate ecological risk ($1 \leq CF < 3$) for the other samples. According to the PLI value, it was determined that all samples had a low risk ($PLI < 10$). While no significant correlation was found between soil pH, EC and organic matter content and microplastic counts, a moderate correlation ($r=0.56$) was found with phosphorus and a weak correlation ($r=0.36$) was found with potassium.

Keywords: Microplastic, Agriculture, Soil, Risk.

tarafından ilk olarak mikroplastiklerin toprak ortamına zarar verebileceğini öne sürülmüştür. Nizzetto vd. [4] mikroplastiklerin toprağa yıllık salınımının okyanuslara salınandan 4 ila 23 kat daha fazla olduğunu rapor etmiştir.

Çevresel ortamlarda bulunan plastik parçalar ultraviyole radyasyonu, çarpışma ile aşınma, hidroliz, toprak erozyonu ve biyolojik etkilere maruz kalarak partikül boyutu 5 mm'den küçük olan mikroplastikleri oluşturmaktadırlar. Mikroplastikler farklı şekillerden (fiber, fragment, film, köpük, pellet gibi), farklı polimer bileşenlerden (polietilen (PE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polietilen tereftalat (PET), polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi) ve farklı renklerden oluşurlar. Kalıcı organik kirleticiler olmalarının yanı sıra mikroplastikler, adsorban özellikleri dolayısıyla pek çok kirleticiyi de bünyelerinde bulundurmakta ve taşıdıkları ortamlarda potansiyel tehdit oluşturmaktadırlar. Mikroplastiklerin farklı çevresel matrislerde (su, toprak), gıdalarda (tuz, bal, çay), içme

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fabeduk@erbakan.edu.tr (F. Bedük)

Geliş / Received: 29.08.2024 Kabul / Accepted: 06.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1540381

suyunda ve hatta insan vücudunda her yerde bulunabildiği yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır [5-8].

Mikroplastiklerin toprağa karışmasının potansiyel yolları atıksular ile tarımsal sulama yapılması, arıtma çamuru ve kompost uygulamaları, plastik malçlama, çöpler ve atmosferik çöküntüler olarak sıralanabilir [9-11]. Tarımsal alanların sulanması için arıtılmamış atıksuların doğrudan kullanımı topraktaki en önemli mikroplastik kaynağıdır [12]. Zhang ve Liu [13] tarafından Çin'de Dian Gölü çevresinde yapılan çalışmada 50 toprak örneğinde 10–0.05 mm boyutlarındaki plastiklerin sayımı yapılmıştır. Toprak örneklerinde 7100-42,960 partikül/kg plastik tespit edilmiştir. Bölgede arıtma çamuru uygulaması ve atıksu sulaması ile sebze yetiştirilen toprak örneklerinde diğer örneklere kıyasla daha fazla plastik tespit edilmiştir.

Arıtma çamurları organik madde, nütrientler ve eser element muhtevası dolayısıyla tarım arazilerinde gübre olarak kullanılmaktadır. Li vd. [14], Çin'de 28 atıksu arıtma tesisinden alınan çamur örneklerinde tespit edilen mikroplastik sayısı $1.60-564 \times 10^3$ MP/kg kuru çamur olmuştur. Çamurun tarım toprağına 5 kez (200 kuru ton/ha) uygulanması sonucunda bir yıl sonra topraktaki mikroplastiklerin ortalama miktarının 3.5 MP/g'a ulaşabileceği tahmin edilmiştir [15]. Çin'in yoğun tarım yapılan topraklarında yapılan bir başka araştırma, yılda hektar başına yaklaşık 23 ton çamur kullanılan toprakların 7-43 MP/g mikroplastik konsantrasyonuna sahip olduğunu ortaya koymaktadır [16]. 2017-2018 yıllarında AB ülkelerinde yaklaşık 44 milyon ton, ABD'de ise 38 milyon ton çamur üretilmiştir. Çamur uygulaması nedeniyle her yıl Avrupa'da 63-430,000 ton mikroplastik, kuzey Amerika'da 44-300,000 ton mikroplastik ve Çin'de ise 80,000-520,000 ton plastiğin tarım arazilerine karışacağı tahmin edilmektedir [17].

Plastik muhtevası olan atıklardan elde edilen kompost da bir mikroplastik kaynağı olmaktadır. Bonn'daki bir kompostlama tesisinde, çıplak gözle görülebilen plastik fragment içeriği 2.38-180 mg/kg'dır ve bu sonuç organik kompostta mikroplastiklerin varlığını doğrulamaktadır [9]. Zhang vd. [11] 15 ve 30 ton/ha çamur kompostu ile yıllık topraklardaki toplam mikroplastik konsantrasyonlarının 87.6 ve 545.9 MP/kg olduğunu ve bunun kompost uygulaması olmayan topraklardan önemli ölçüde daha yüksek olduğunu yayınlamıştır. Bu sonuçlar kompostu mikroplastiklerin toprağa girmesinin önemli yollarından biri haline getirmektedir.

PVC ve PE'den oluşan malç örtü uygulamaları daha fazla hasat, gelişmiş meyve kalitesi ve su kullanım verimliliği gibi ekonomik faydaları nedeniyle küresel tarımsal üretimde yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Tüm malçlama örtülerinin tarım arazilerinden çıkarılması, yoğun emek ve zaman alıcı bir iştir. Bu nedenle malçlama örtüsü veya parçaları genellikle bilerek veya bilmeden tarım arazilerinde bırakılmaktadır. Film malç örtülerinin ne kadarının geri kazanımının araştırıldığı çalışmada geri dönüşüm oranının İsveç (%68) ve İrlanda'da (%63) en yüksek olduğu, Bulgaristan ve Romanya gibi bazı Doğu Avrupa ülkelerinde ise neredeyse sıfır olduğu tespit edilmiştir [1]. Tarım arazisinin yüzeyinde kalan büyük

plastik malç döküntüleri ultraviyole ışığa maruz kalmasıyla fotodegradasyona uğrar ve kırılğan hale gelir. Toprağın işlenmesiyle birlikte zaten kırılğan olan plastiklerin daha fazla parçalanması gerçekleşir.

Mikroplastikler toprak su tutma kapasitesi, toprak pH'sı, toprak organik maddesi, toprak agregası boyutu ve stabilitesi, ve toprak enzim aktivitesi gibi toprağın biyofiziksel özelliklerini etkileyebilir [18-20]. Mikroplastikler yapılarındaki polimer katkı maddeleri, plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, ısı stabilizatörleri ve antioksidanlar gibi maddeleri ve adsorbe ettiği kirleticiler topraktaki canlı yaşamında ekolojik risklere sebep olabilirler [21, 22]. Ayrıca besin zinciri simülasyonu ve saha çalışmaları, mikroplastiklerin besin zinciri yoluyla aktarılacağı hipotezini doğrulamaktadır [23]. Dolaylı olarak mikroplastikler toprağın solunumunu teşvik ederek ve ağaçlar gibi doğal karbon yutaklarını olumsuz etkileyerek iklim değişikliğine katkıda bulunabilmektedir. PE, PS, PP, PVC, LDPE, polylactic acid (PAA) polimerlerini içeren mikroplastiklerin topraktan atmosfere CO₂, CH₄ ve N₂O sera gazlarının emisyonunu artırdığı çalışmalarda tespit edilmiştir [24].

Dünyada deniz ortamında kapsamlı ve ayrıntılı mikroplastik çalışmaları yapılmış ve birçok ülke denizlerdeki plastik atıkların ve mikroplastiklerin rutin olarak izlenmesine başlamıştır. Mikroplastik ekolojik sistem üzerinde potansiyel riskleri nedeniyle küresel ölçekte toprakta ortaya çıkan endişe verici bir kirleticidir. Karasal ekosistem akuatik ekosisteme göre mikroplastik kirliliğe daha çok maruz kalmasına rağmen, toprak ve karasal ekosistemlerdeki mikroplastiklere odaklanan çok az sayıda çalışma vardır. Ülkemizde de benzer olarak mikroplastiklerin tespiti ile ilgili deniz suyunda, yüzeysel sularda, atıksuda, çeşitli gıdalarda çalışmalar gerçekleştirilmiş olup toprakta mikroplastiklerin varlığı ile ilgili az sayıda çalışmaya rastlanmıştır [25, 26]. Akça vd. [25] tarafından yapılan çalışmada Konya İli Hüyük İlçesi tarım topraklarında çilek üretiminde plastik malç uygulamasından kaynaklı plastik birikimi araştırılmıştır. Ülkemizde toprakta mikroplastik kirliliğine ilişkin olarak yapılmış başka bir çalışmaya rastlanmamıştır. Türkiye'nin tahıl ambarı olarak nitelendirilen Konya Havzası'nda tarım topraklarında mikroplastik varlığı, tarımsal sürdürülebilirliğe etkileri ve mikroplastiklerin oluşturduğu risk henüz araştırılmamış konulardır. Konya Havzası geniş ovalarında tahıl grubu ürünler ve şeker pancarı yetiştiriciliği yapılmaktadır. Konya İli tarımsal topraklarındaki mikroplastik kaynaklı kirlenme uzun vadede tarımın sürdürülebilirliğini etkileyebilecek potansiyele sahiptir. Bölgedeki mikroplastik kirliliğinin boyutunun belirlendiği bu çalışma ülkemizde bir ilk özelliğini taşımaktadır. Bölgede malç uygulamasının yaygınlaşması, arıtma çamurlarının toprağa uygulanması, arıtılmış atıksular ile sulama yapılması vb. uygulamalar konunun araştırılmasını daha da önemli hale getirmektedir.

2 Materyal ve metod

2.1 Çalışma alanı ve numune alma

Türkiye'nin tahıl ambarı olarak nitelendirilen Konya Havzası ülkenin en az yağış alan bölgesi olup kurak, yarı kurak iklim özelliğine sahiptir [27]. Konya, 2.6 milyon hektarlık tarım alanı ile ülkenin toplam tarım alanının %11.2'i gibi çok önemli bir oranını oluşturmaktadır. Türkiye'nin toplam tarımsal üretiminin %10'u Konya tarafından karşılanmaktadır. Havzada en geniş alanı kaplayan Konya İli'nin toplam yüz ölçümünün 2,659,890 hektar alanı tarıma elverişli durumdadır. Tarımsal üretimde tahıl grubunda buğday, arpa, baklagillerde nohut, kuru fasulye, yeşil ve kırmızı mercimek, endüstriyel üretimde ise şeker pancarı yetiştirilmektedir. Sulu tarımın gerçekleştirildiği alanlarda yüzeysel su kaynakları ile sulama, arıtılmış kentsel atıksu ile sulama işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca kimyasal gübre uygulamalarının yanı sıra kompost ve stabilize arıtma çamurunun uygulandığı tarımsal alanlar da bulunmaktadır. Özellikle malçlama yapılarak sebze ve meyve yetiştiriciliği yaygın uygulamalardır.

Bu çalışmada numuneler, Konya İli ve yakın çevresinden seçilen ve tarımsal faaliyet gerçekleştirilen 20 noktadan alınmıştır (Şekil 1). Numune noktalarında ve çevresinde malç uygulaması ile sebze yetiştiriciliği yaygındır. Numune noktaları; 1. Akören, 2. Altınekin, 3. Bozkır, 4. Cihanbeyli, 5. Çumra, 6. Doğanhisar, 7. Ereğli, 8. Güneysınır, 9. Hadim, 10. Hüyük, 11. Ilgın, 12. Karapınar, 13. Karatay, 14. Meram, 15. Sarayönü, 16. Selçuklu, 17. Taşkent, 18. Yunak, 19. Eski/Aksayar, 20. Karaman'dır. 1 kg'lık toprak örnekleri 0-20 cm derinlikten paslanmaz çelik kürek ile alınmıştır. Örnekleme öncesi toprak yüzeyi iri parçalardan temizlenmiştir. Mikroplastik ve fiziko-kimyasal analizler için ayrı ayrı örnekleme kapları kullanılmıştır. Mikroplastik

analizi için alınan örnekler alüminyum folyo içerisine sarılarak koton bez torba içerisine konulmuştur. Laboratuvar ortamına taşınan toprak örnekleri analiz işlemlerine kadar 4 °C'de buzdolabında bekletilmiştir.

2.2 Toprakta mikroplastik analizi

2.2.1 Toprak örneklerinin analize hazırlanması

Toprak örnekleri analiz öncesi laboratuvar ortam sıcaklığında kurutulmuştur [28]. Aglomera toprak örnekleri hafifçe ezilmiştir. İçerisinde yabancı ot, bitki kökü gibi gözle görülebilir mikroplastik dışı safsızlıklar manuel olarak ayrılmıştır. Kurutulmuş toprak örnekleri 5 mm gözenek çapına sahip paslanmaz çelik elekten elenmiştir [29, 30].

2.2.2 Mikroplastiklerin topraktan ayrılması

Toprak matrisi içerisindeki mikroplastiklerin ayrılması için yoğunluk ayırma metodu kullanılmıştır. Bu amaçla 50 gr toprak numunesine 100 mL ZnCl₂ ilave edilmiştir sonra 25 °C'de 35 KHz frekansta 15 dk ultrasonik ekstraksiyon yapılmıştır. Ardından 30 dk 600 rpm'de karıştırılmıştır. Karışım faz ayırımının tamamlanması için 24 saat çeker ocak içerisinde ve beherlerin ağızları alüminyum folyo ile kapatılarak bir sonraki işleme geçilmiştir [31].

2.2.3 Organik maddelerin uzaklaştırılması

Mikroplastikler üzerindeki doğal organik maddenin uzaklaştırılması için ıslak peroksit oksidasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ajansı tarafından tanımlanmış olan metotta [32] belirtildiği şekilde yoğunluk ayırma işleminde faz ayırımı gerçekleşen numunelerde üst faz 20 µm elekten süzülükten sonra saf su ile elek üzerinde kalan kalıntı birkaç kez yıkanmıştır. Elek üzerindeki kalıntı behere aktarılmış ve üzerine 20 mL H₂O₂ ve 20 mL 0.05 M Fe (II) çözeltileri ilave edilmiştir.



Şekil 1. Numune alma noktaları

Oksidasyonun tamamlanması için beherler ağızları alüminyum folyo ile kapalı şekilde çeker ocak içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Oksitlenen karışım 0.45 µm gözenek çapına sahip millipore marka kareli filtreden süzölmüştür. Mikroplastik analiz aşamasında filtrasyon işlemi kullanılan filtre kareli olup, her bir karedeki mikroplastik sayısı, rengi ve şekli ayrı ayrı mikroskop altında tespit edildikten sonra tüm karelerde elde edilen sayılar toplanarak bir numunedeki mikroplastik sayısı tespit edilmiştir. Filtre kağıtları cam petri kabı içerisine alınarak desikatör içerisinde kuruması için bekletilmiştir. Kuruma işleminin ardından mikroskop ile mikroplastiklerin sayımları gerçekleştirilmiştir.

2.2.4 Mikroplastiklerin tanımlanması ve karakterizasyonu

Filtre kağıdı üzerindeki mikroplastiklerin sayımı ışık mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için laboratuvarımızda mevcut olan Nikon Eclipse E200 marka 10X-20X-40X-100X büyütme özelliğine sahip Kameram (digital mikroskop mikro yapı görüntüleme ve ölçüm yazılımı) yazılımı içeren mikroskop, Nikon CI-S model trinoküler faz kontrast ışık mikroskobu 10X-20X-40X-100X büyütme özelliğine sahip Kameram (digital mikroskop mikro yapı görüntüleme ve ölçüm yazılımı) yazılımı içeren mikroskop ve Krüss marka 1X-3X büyütme özelliğine sahip mikroskop kullanılmıştır. Sayımı yapılan mikroplastikler görsel morfolojik sınıflandırması fiber, köpük, film, pellet ve fragment olarak yapılmıştır. Mikroplastikler transparan, beyaz, mavi, siyah, yeşil, sarı, kahverengi, pembe ve gri renklerine göre gruplandırılmıştır. Mikroplastik miktarı kilogram kuru toprak kütlesi başına mikroplastik parçacıkların sayısı olarak ifade edilmiş ve MP/kg şeklinde verilmiştir.

2.3 Toprağın fiziko-kimyasal analizleri

Toprak örnekleri kullanılmadan önce numune hazırlama aşamasında, 2 mm'lik elekten elenmiştir [33]. Toprak örneklerinin kil/silt/kum içeriği Bouyoucos Hydrometer metoduna göre tespit edilmiştir. 50 g numune ve 2 g sodyum hexametaphosphate beher içerisine konularak yaklaşık 600 mL saf su eklenmiş ve 5 dakika mikser ile karıştırılmıştır. Toprak süspansiyonu mezür içerisine konularak içerisinde hidrometre varken 1130 mL çizgisine kadar saf su ile doldurulmuştur. Hidrometre mezür içerisinden uzaklaştırılarak ve mezürün ağız kapatıldıktan sonra ters-düz edilerek toprak süspansiyonunun tamamen karışması sağlanmıştır. Süspansiyonun ilk hidrometre ve sıcaklık okumaları 40 sn sonra, ikinci okumaları ise 2 saat sonra gerçekleştirilmiştir. Toprak numunelerinin kütlesi alınırken nem içeriklerine göre düzeltme yapılmıştır. 1. hidrometre okuması silt ve kil kütlesini, 2. hidrometre okuması ise kil kütlesini vermektedir. Hesaplamalar gerçekleştirildikten sonra tekstür üçgeni kullanılarak toprak tipi belirlenmiştir [34]. Toprak numunelerinin pH'ı, hazırlanan saturasyon çamurunda cam elektrotlu pH metre ile ölçülmüştür [35]. Toprak numunelerinde organik madde (%) modifiye edilmiş Walkley-Black yöntemiyle 1 g toprak kullanılarak belirlenmiştir [36]. Toprak örneklerinin toplam azot (T-N)

tainleri (%) Kjeldahl metoduna göre 1 g toprak kullanılarak Velp marka azot tayin cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [37]. Alkalın ve nötr karakterli toprakların fosfor içerikleri (mg/kg) 5 g toprak kullanılarak Olsen yöntemine göre belirlenmiştir [38]. Toprakta kireç (CaCO₃) (%) Scheibler kalsimetresinde volümetrik olarak belirlenmiştir. Ekstrakte edilebilir potasyum (mg/kg) 1 N amonyum asetat (pH=7.0) çözeltisi ile ekstrakte edilerek ICP OES cihazında belirlenmiştir.

2.4 Metot validasyonu

Toprak örnekleri plastik kontaminasyonu önlemek için cam kaplar veya alüminyum folyo içerisine konulmuştur. Analizler esnasında plastik malzeme kullanımından kaçınılmıştır. Laboratuvarında analiz işlemleri esnasında havadan gelebilecek kontaminasyonu önlemek için numunelerin üzeri alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Kıyafetlerden kaynaklı fiber mikroplastik, eldiven kullanımında gelebilecek mikroplastik kontaminasyonunu önlemek için araştırmacılar tarafından pamuk laboratuvar önlüğü, lateks eldiven kullanılmış ve analizler esnasında maske takılmıştır. Deneyler 2 tekrar olarak gerçekleştirilmiş ve analizlerle eş zamanlı kör numune analizleri yapılmıştır. Kör numune analizi, analiz aşamalarından kaynaklanan mikroplastik kontaminasyonunu kontrol etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla toprak örnekleri ile paralel olarak mikroplastik analiz yöntemi (yoğunluk ayırma, organik maddenin uzaklaştırılması, filtrasyon gibi) toprak örneği içermeden, yalnız kimyasallar ve ayırma ekipmanları kullanılarak kör numune analizi olarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kör numune çalışmalarında metot basamaklarından kaynaklanan mikroplastik bulaşması tespit edilmemiştir. Analiz işlemlerinin tüm aşamalarında deiyonize su kullanılmıştır.

Mikroplastik analizi metot geri kazanım çalışması Rodrigues vd. [39] tarafından gerçekleştirilen yöntem modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. Metot validasyonu için günlük yaşamımızda yaygın olarak kullanılan 6 farklı polimer türüne karşılık gelen damacana kapağı (LDPE), süt şişesi (HDPE), şişe kapağı (PP), CD kutusu (PS), su borusu (PVC), su şişesi (PET) örnekleri el değirmeninde 5 mm'den daha küçük olacak şekilde öğütülmüştür. 5 mm altındaki plastik parçacıklar mikroplastik olarak tanımlandığı için öğütülen parçacıklar 5 mm elekten geçirildikten sonra her bir örnekten yaklaşık 0.05 g konulmuştur. Her bir malzemenin yoğunluğu farklı olduğundan konulan tanecik sayısı malzeme yoğunluğuna göre değişmektedir. Mikroplastik parçacıkların yoğunluğu ve büyüklüklerindeki farklılıklara göre LDPE mikroplastiklerinden 49 adet, HDPE mikroplastiklerinden 52 adet, PP mikroplastiklerinden 40 adet, PS mikroplastiklerinden 36 adet, PVC mikroplastiklerinden 47 adet, PET mikroplastiklerinden 150 adet olmak üzere toplamda 374 adet mikroplastik parçacığı 20 g toprak örneklerine eklemeye yapılmıştır. Mikroplastik analiz yöntemlerinden sonra her bir polimer türü konulduğu ağırlık ve tanecik sayısı açısından tekrar hesaplanarak geri kazanım değerleri hesaplanmıştır. Bu amaçla eklenen polimer türünün ağırlığından, metot basamakları

uygulandıktan sonra ölçülen polimer türü ağırlığı çıkarılarak ve eklenen polimer türünün sayısından, metot basamakları uygulandıktan sonra ölçülen polimer türü sayısı çıkarılarak yüzde geri kazanım değerleri tespit edilmiştir. 20 mL deiyonize su eklenen karışım 30 dk mekanik çalkalayıcıda karıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında kurutulmuştur. Yukarıda verilen metot; yani yoğunluk ayırma, organik madde uzaklaştırma ve mikroplastiklerin tanımlanması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Geri kazanım verimi tanecik ağırlığı açısından %90-100, tanecik sayısı açısından ise %94-104 olarak tespit edilmiş, kullanılan metodun başarıları teyit edilmiştir.

2.5 Risk değerlendirme

Mikroplastik kirliliği kaynaklı risk seviyesinin belirlenmesi için kirlilik faktörü (CF, contamination factor) **Denklem 1** ile hesaplanmıştır [40]. Burada, CF_i mikroplastiklerin kirlilik faktörü, C_i tespit edilen mikroplastik miktarı, C_{oi} mikroplastiklerin arkaplan değeridir. C_{oi} değeri tespit edilen en düşük mikroplastik değeri olarak alınmıştır. C_{oi} değeri çalışmada 0-10 cm derinlikten alınan kontrol topraklarında tespit edilen en düşük mikroplastik değeri 100 MP/kg. CF değerleri < 1 ise düşük kirlilik, $1 \leq CF < 3$ ise orta derecede kirlilik, $3 \leq CF < 6$ ise önemli miktarda kirlilik, $CF \geq 6$ ise çok yüksek kirlilik olarak değerlendirilmiştir [41, 42].

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{oi}} \quad (1)$$

Kirlilik yük endeksi (PLI, pollution load index) her bir örnekleme noktası için **Denklem 2** kullanılarak hesaplanmıştır. Burada PLI örnekleme noktasındaki mikroplastik yük endeksidir. $PLI < 10$ ise çalışma alanı tehlike kategorisi I'de, $10 < PLI < 20$ ise tehlike kategorisi II'de, $20 < PLI < 30$ ise tehlike kategorisi III'de ve $PLI > 30$ ise tehlike kategorisi IV olarak sınıflandırılmaktadır [42, 43].

$$PLI = \sqrt{CF_i} \quad (2)$$

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Toprakta tespit edilen mikroplastik miktarları

Şekil 2'de 20 adet toprak örneğinde tespit edilen toplam mikroplastik sayıları (MP/kg) verilmiştir. Toplam mikroplastik sayıları 80-340 MP/kg arasında değişmiş olup, ortalama 146 MP/kg tespit edilmiştir. **Tablo 1**'de çeşitli ülkelerde yapılmış olan çalışmalarda belirlenmiş olan mikroplastik miktarları verilmiştir. Konuyla ilgili literatürdeki yayınlar incelendiğinde analizi yapılan mikroplastik büyüklüğünün, numune alınan toprak derinliğinin ve mikroplastiklerin topraktan ayrılması ve sayılması yöntemlerinin değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle elde edilen sonuçların birbiri ile kıyaslanması yanıltıcı olabilir. Mikroplastığın tarım topraklarına girişi için pek çok faktör bulunmaktadır. Bu nedenle mikroplastik sayısı açısından tarım topraklarında bölgesel olarak da önemli farklılıklar tespit edilmektedir.

Harms vd. [52] tarafından Kuzey Almanya'da yapılan çalışmada tarım topraklarında 1-5 mm büyüklüğündeki

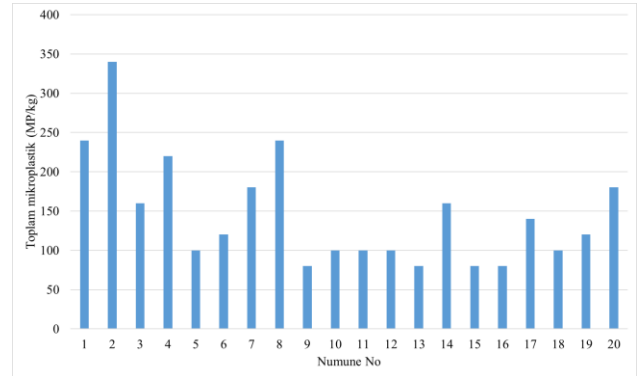
mikroplastik miktarı 3.7 MP/kg gibi oldukça düşük bir değer olarak raporlanırken, Crossmann vd. [56] tarafından Ontario, Kanada'da yapılan çalışmada tarım topraklarında < 5 mm büyüklüğündeki mikroplastik miktarı 541 MP/kg olarak raporlanmıştır.

3.2 Toprakta tespit edilen mikroplastiklerin morfolojik karakterizasyonu

Her bir toprak örneğinde tespit edilen film, fragment, pellet, köpük ve fiber şekilli mikroplastik sayıları **Şekil 3**'te ve mikroplastik şekillerinin oranları **Şekil 4**'te verilmiştir. Toprak örneklerinde %45 fiber (1300 MP); %25 pellet (720 MP); %18 film (540 MP); %7 fragment (200 MP) ve %5 köpük (160 MP) tespit edilmiştir. **Tablo 1**'de verilen literatür örneklerinde de yaygın olarak fiber, fragment, köpük, film, pellet şekilli mikroplastiklerin tespit edildiği, baskın olarak ise bizim çalışma sonucumuzda tespit ettiğimiz gibi fiber ve film şekilli mikroplastiklerin tespit edildiği görülmektedir. Corradini vd. [15] tarafından yapılan çalışmada arıtma çamuru uygulanmış topraklarda tespit edilen MP'lerin %97 gibi önemli bir kısmını fiberlerin oluşturduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, Zhou vd. [44] tarafından yapılan çalışmada malç uygulaması yapılan arazilerde daha fazla sayıda MP tespit edildiği, tespit edilen plastikleri fragmentlerin domine ettiği raporlanmıştır. Mikroplastiklerin morfolojik karakterizasyon mikroskop görüntüleri **Şekil 5**'te verilmiştir.

3.3 Toprakta tespit edilen mikroplastiklerin renkleri

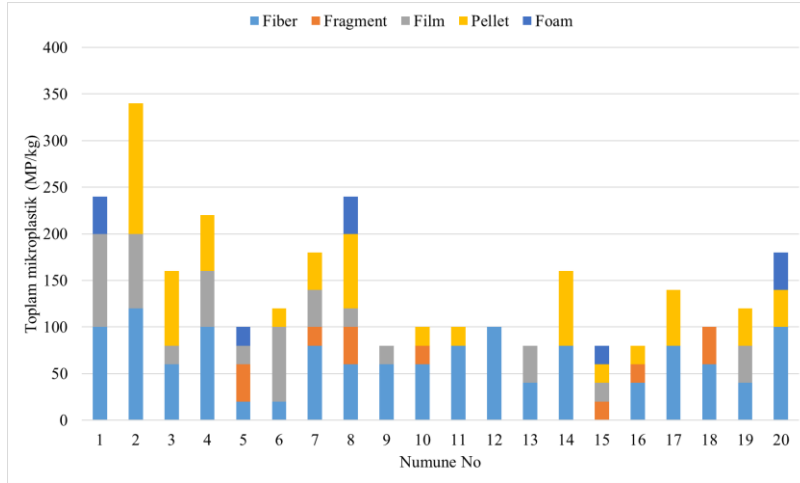
Her bir toprak örneğinde tespit edilen mikroplastiklerin renkleri **Şekil 6**'da ve mikroplastik renklerinin oranları **Şekil 7**'de verilmiştir. Toprak örneklerinde şeffaf, siyah, mavi, beyaz, kahverengi, pembe, sarı, kırmızı ve yeşil renkli plastikler tespit edilmiştir. %51 oranla en fazla şeffaf renkli mikroplastığe rastlanırken, ikinci sırada siyah renkli mikroplastikler tespit edilmiştir. Choi vd. [55] tarafından orman, şehir ve zirai bölgelerden alınan toprak örneklerinde yapılan MP analizi sonucunda caddelere yakın olan bölgelerden alınan toprak örneklerinde araç tekerleği kaynaklı siyah renkli MP parçalarının çoğunlukta olduğu tespit edilmiştir.



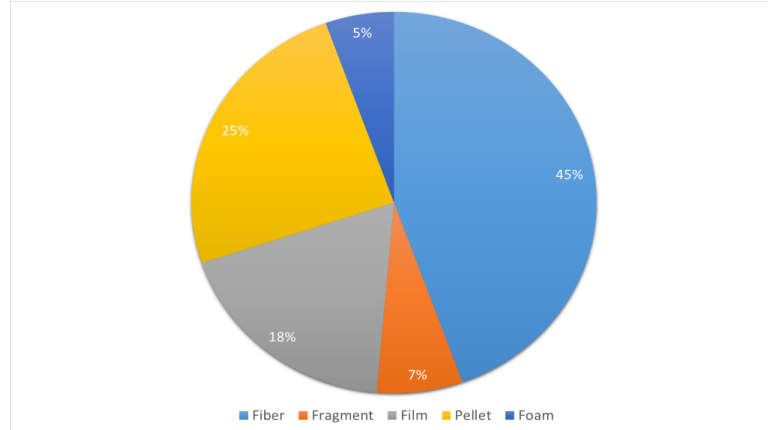
Şekil 2. Toprak örneklerinde tespit edilen mikroplastik (MP) sayıları (MP/kg)

Tablo 1. Literatürde toprakta tespit edilen mikroplastikler

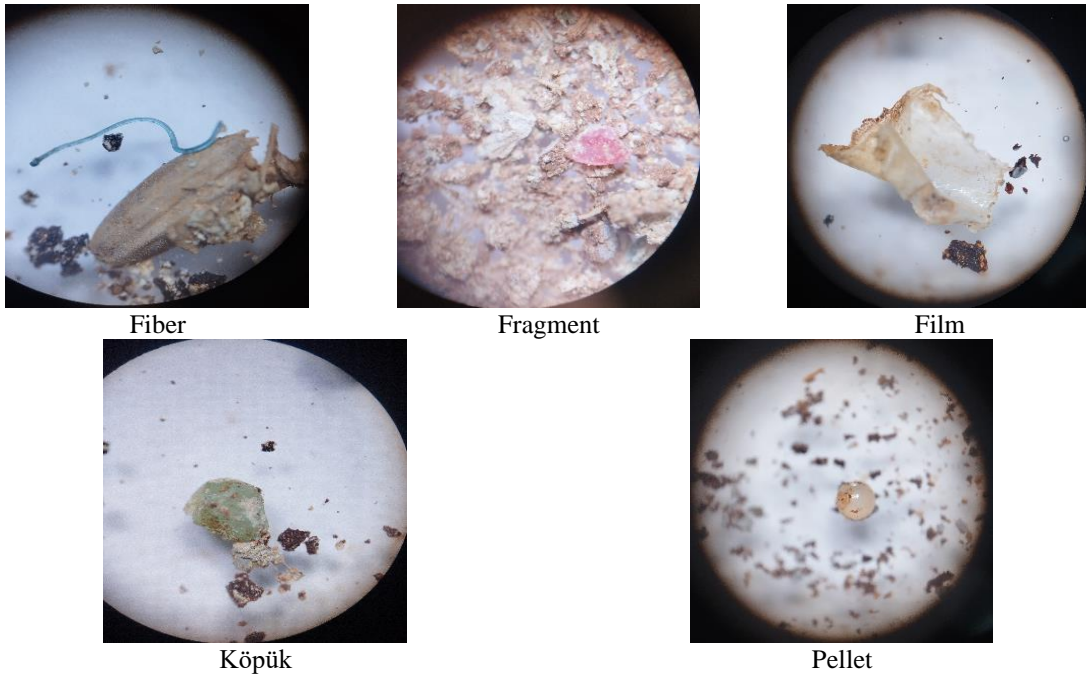
Ülke	Bölge	Arazi türü/ürün/toprak derinliği	Mikroplastik miktarı (MP/kg)	Mikroplastik büyüklüğü	Mikroplastik şekli	Mikroplastik polimer türü	Kaynak
Çin	Hang Zhou Bay plain	Malçlama yapılan/yapılmayan tarım arazisi 0-10 cm	571.2 / 262.7	<5 mm	Film, fragment, fiber	PE, PP, PES, Rayon	[44]
Çin	Daliao Nehir Havzası	5 cm	233.33	0-100 µm (<%1) 100-500 µm (%19) 500-1000 m (%41) 1000-2000 µm (%26) 2000-5000 µm (%11)	Fragment, film, köpük	PE, PP, PS, PA	[45]
Çin	Shanghai	Sığ toprak/derin toprak 0-3 cm/3-6 cm	78 / 62.5	0.03-5 mm	Pellet, fragment, film, fiber	PP, PE	[46]
Çin	Mu Us Sand Land	0-10 cm	2696.5	0-0.5 mm	Film, pellet, fragment, fiber	PS, PE, PP, PVC	[47]
Çin	Tibetan Platosu	Sığ/derin toprak 0-3 cm/3-6 cm	52.67 / 45.33	< 50 µm (38.2%) 50-100 µm (25.84%) 100-500 µm (23.59%) >500 µm (12.37%)	Fiber, fragment, sphere, köpük	PE, PA, PP, PS	[48]
Çin	Xinjiang	Tarım alanı	206.46	-	-	-	[49]
İspanya	Murcia	Sebze tarlası, kırsal bölge, 0-10 cm	2116	-	-	-	[50]
İspanya	Valencia	Zeytin ve tahıl tarım arazisi	930-11100	150-250 µm	Fragment, fiber, film	PP, PVC	[51]
Almanya	Kuzey Almanya	Tarım arazisi 10 – 20 – 30 cm	3.7	1-5 mm	Foil, fragment, platelet, fiber	PE	[52]
Meksika	Oaxaca	Çam tarlaları, meralar, neotropikal yağmur ormanları ve Savan 0-20 cm	2.54	40-500 µm	Fiber	-	[53]
Güney Kore	Yongin kırsal bölge	Pirinç ekim alanı Malçlama alanı Seranın içi Seranın dışı 5 cm	160 81 1880 1302	< 5 mm	Fragment, sheet, fiber	PE, PP, PET	[54]
Güney Kore	Yeoju	Orman toprağı Trafik toprağı Yerleşim alanı Tarım alanı 0-5 cm	160 1108 500 664	<1 mm (%86) 1-5 mm (%13)	Fragment, film, fiber, sphere	PP, PP, SIS, SBR, EPS	[55]
Şili	Metrololitana	Ürün arazisi Mera 0-20 cm	540 420	-	Fiber, film, fragment, pellet	Akrilatlar, vernik, PU, PE	[15]
Kanada	Ontario	Tarım arazisi	541	<5 mm	Fragment, fiber	PP, PE, PES, akrilik	[56]
Brezilya	Todos os Santos Bay,	Mangrov toprakları	10782	150-200 mm	Pellet, köpük, film fragment, fiber	-	[57]
İran	Persian Körfezi	Mangrov toprakları	23-1354	0.25-5 mm	Film, fragment, fiber	PS, PT, PET, LDPE, naylon	[58]



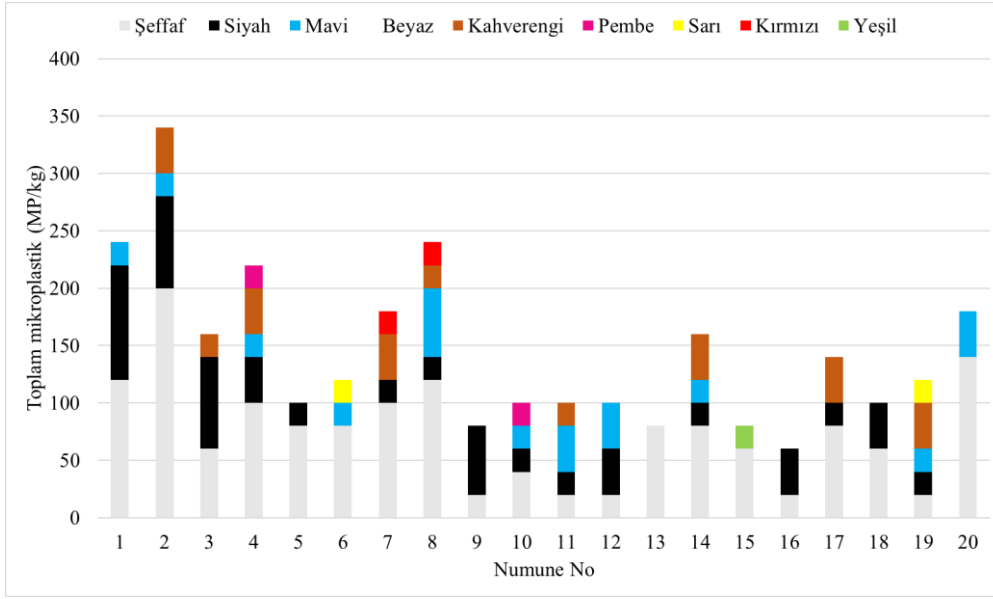
Şekil 3. Toprak örneklerinde tespit edilen mikroplastiklerin morfolojik karakterizasyonu



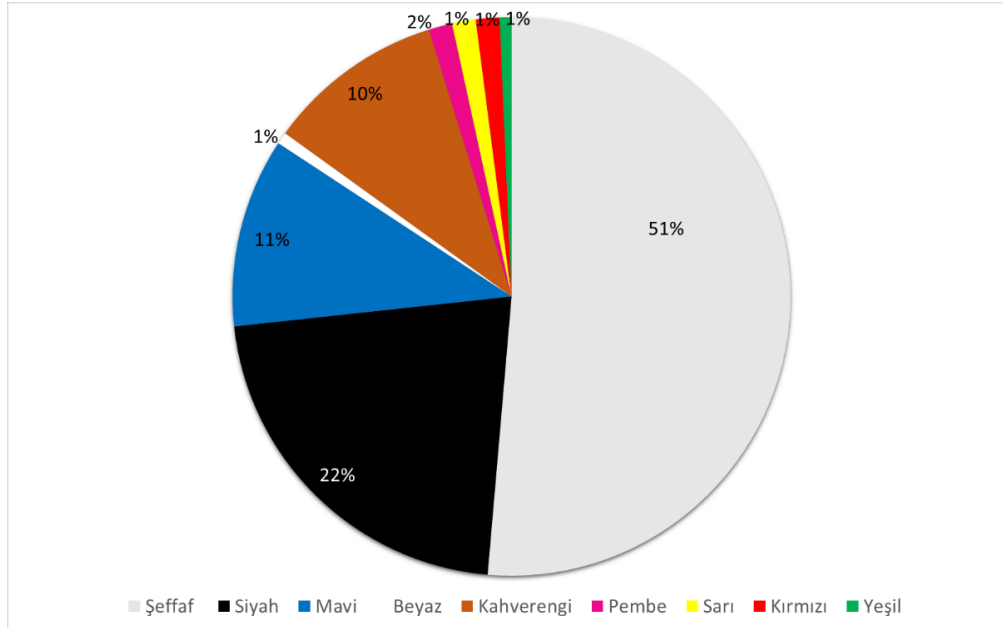
Şekil 4. Toprak örneklerinde tespit edilen mikroplastik morfolojik oranları



Şekil 5. Mikroplastiklerin morfolojik sınıflandırılması



Şekil 6. Toprak örneklerinde tespit edilen mikroplastiklerin renkleri



Şekil 7. Toprak örneklerinde tespit edilen mikroplastik renklerinin oranları

3.4 Mikroplastiklerin risk değerlendirmesi

Mikroplastikler mahsullerin büyümesini ve gıda güvenliğini tehlikeye sokmakta ve aynı zamanda ekolojik riskler de oluşturmaktadır. Topraklarda tespit edilen mikroplastik kirliliğinin risk seviyesinin belirlenmesi için kirlilik faktörü (CF) ve kirlilik yük endeksi (PLI) değerleri hesaplanmış ve risk kategorilerine göre değerlendirilmiştir. Tablo 2’de toprak örneklerinde tespit edilen CF ve PLI değerleri ile risk sınıflandırması görülmektedir. 1, 2 ve 8 numaralı numunelerde CF değerinin önemli ekolojik risk oluşturduğu, diğer numuneler için orta seviyede ekolojik risk olduğu tespit edilmiştir. 1, 2 ve 8 numaralı örnekler sırasıyla

Akören, Altnekin ve Güneysınır’dan alınan toprak örnekleridir. Bu bölgelerde malçlama ile sebze yetiştiriciliği dikkat çekmektedir. Toprak nemini koruma, güneş ışığını keserek yabancı otların büyümesini engelleme, bitki olgunlaşmasını hızlandırma vb. amaçlarla kullanılan malç örtüsü bölgede yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekim sezonu sonunda malç örtüsünün toprak yüzeyinden toplanmaması, toprağa karıştırılması vb. uygulamalar toprakta plastik birikimini artırmaktadır. PLI değerine göre numunelerin tümü için düşük risk olduğu tespit edilmiştir. Çalışmadaki CF ve PLI değerlerinin dağılımı sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9’da verilmiştir. PLI değerleri dar bir aralıkta değişim

gösterirken, önemli ekolojik risk oluşturan CF değerlerinin nispeten geniş aralıkta değiştiği görülmektedir. Bangladeş'te tarım arazilerinde kirlilik faktörü açısından orta düzeyde kirliliğin olduğu ve ekolojik çevre güvenliğine yönelik endişelerin olduğu rapor edilmiştir [36]. Çin'de tarımsal topraklarda araştırılan mikroplastiklerin ekolojik ve kirlilik riski değerlendirilmiş, PLI değerleri 1 ile 2.48 aralığında tespit edilmiş ve tüm numune alma bölgeleri risk kategorisi I (hafif kirlenme) olarak sınıflandırılmıştır [59].

Tablo 2. Toprak örneklerinin CF ve PLI değerleri ile risk sınıflandırması

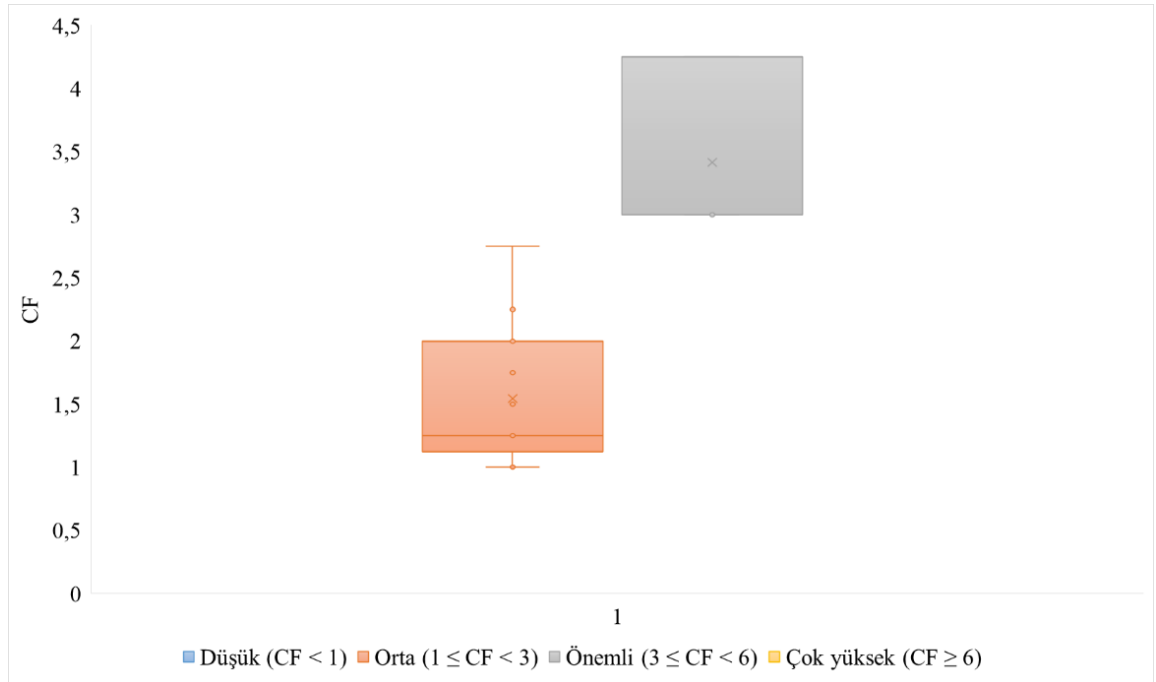
Düşük (CF < 1)	Orta (1 ≤ CF < 3)	Önemli (3 ≤ CF < 6)	Çok yüksek (CF ≥ 6)
Tehlike I (PLI < 10)	Tehlike II (10 ≤ PLI < 20)	Tehlike III (20 ≤ PLI < 30)	Tehlike IV (PLI ≥ 30)
Numune no	CF	PLI	
1	3.00	1.73	
2	4.25	2.06	
3	2.00	1.41	
4	2.75	1.66	
5	1.25	1.12	
6	1.50	1.22	
7	2.25	1.50	
8	3.00	1.73	
9	1.00	1.00	
10	1.25	1.12	
11	1.25	1.12	
12	1.25	1.12	
13	1.00	1.00	
14	2.00	1.41	
15	1.00	1.00	
16	1.00	1.00	
17	1.75	1.32	
18	1.25	1.12	
19	1.50	1.22	
20	2.25	1.50	

3.5 Toprağın fiziko-kimyasal analiz sonuçları ve mikroplastik dağılımı ile ilişkisi

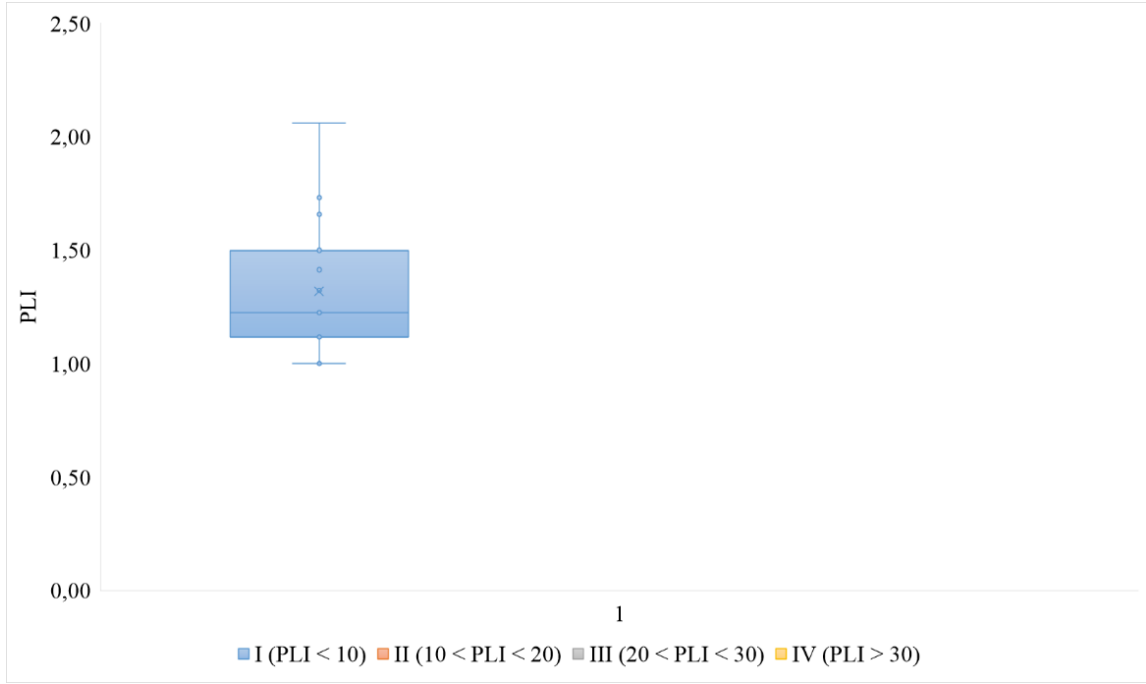
Mikroplastikler katı bir kirletici olarak toprağa ulaştıktan sonra kuru ve ıslak döngüler, toprak işleme faaliyetleri, ekolojik bozulma ile toprak agregatlarına kolayca entegre olurlar ve pH, su tutma kapasitesi, toprak yapısı gibi toprağın fiziko-kimyasal özelliklerini doğrudan ve dolaylı olarak etkilerler. Ek olarak, küçük parçacık boyutları, geniş spesifik yüzey alanları, hidrofobiklikleri ve güçlü adsorpsiyon kapasiteleri nedeniyle mikroplastikler toprak ortamındaki toprak parçacıklarıyla kolayca birleşebilir ve yavaş yavaş toprak parçacıklarının fiziko-kimyasal özelliklerini şekillendirebilirler.

3.5.1. Toprak tekstürü

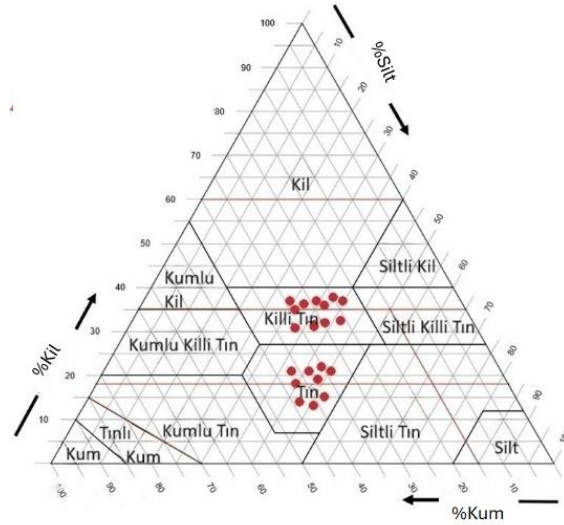
Toprak örneklerinin kum/kil/silt oranına göre tekstür sınıfları Şekil 10'da verilen tekstür üçgeni üzerinde gösterilmiştir. Toprak örneklerinin killi-tınlı ve tınlı özellikte oldukları tespit edilmiştir. Kil içeriği yüksek topraklara mikroplastik ilavesinin, killi olmayan topraklara göre, toprak özellikleri üzerinde daha güçlü etki gösterdiği rapor edilmiştir [60]. PES-mikroplastik uygulaması ile killi-tınlı topraklarda toprak agregatlarının oluşumu ve suya dayanıklı büyük agregatlar artarken [61], tınlı-kumlu topraklarda suya dayanıklı agregatların oluşumu azalmıştır [62]. Toprakta mikroplastik kirliliğinin toprak tekstürünü etkilemediğine dair görüşler bulunmaktadır. Örneğin, polyester mikroplastik %0.5 ve %100.0 ile kontamine olmuş toprakta, toprak tekstürünün değişmediğini bildirmiştir [63, 64].



Şekil 8. Toprak örneklerinde CF değerlerinin dağılımı



Şekil 9. Toprak örneklerinde PLI değerlerinin dağılımı



Şekil 10. Toprak örneklerinin kum/kil/silt oranına göre tekstür sınıfları

3.5.2. Toprak pH, EC, organik madde, fosfor, potasyum değerleri ve mikroplastik dağılımı

Toprak örneklerinin fizikokimyasal özellikleri; pH; EC; organik madde; fosfor ve potasyum ile bu özelliklere göre ayrılmış mikroplastik sayıları sırasıyla Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'te verilmiştir. Toprak örneklerinin pH değerlerinin nötr (pH 6,5-7,5) veya hafif alkali (pH 7,5-8,5) özellikte oldukları tespit edilmiştir. Toprak pH ve toprakta tespit edilen mikroplastik sayısı arasındaki ilişki Pearson korelasyon katsayısı ile değerlendirildiğinde $r=0.04$ olup, anlamlı bir ilişki tespit

edilememiştir. Toprak pH'sı, arazi kullanımı ve arazi örtüsü tarzlarındaki değişikliklerden ve insan ya da doğal faaliyetlerin neden olduğu yönetimden etkilenebilir [65, 66]. Toprakların insan faaliyetleri nedeniyle kasıtlı veya kasıtsız olarak mikroplastiklerle kirlenmesinin uzun vadede toprak pH'sını artırdığı veya azalttığı bilinmektedir [67, 68]. Örneğin, toprağın bir mikroplastik karışımına maruz kalması toprağın pH'sını artırır [69]. Buna mukabil, yüksek yoğunluklu polietilene 30 gün maruz kaldıktan sonra toprağın pH'sının düştüğü tespit edilmiştir [67, 68].

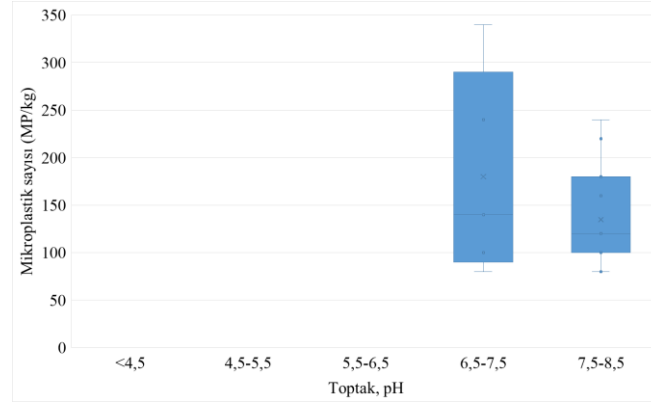
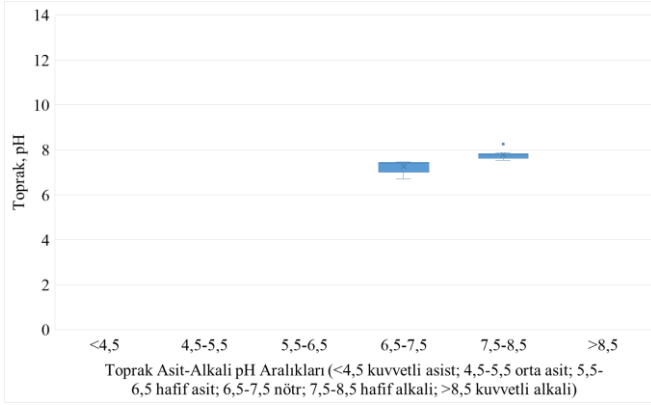
Toprak örneklerinin EC değerleri incelendiğinde tuzsuz veya çok hafif tuzlu özellikte oldukları tespit edilmiştir. Toprak EC ve toprakta tespit edilen mikroplastik sayısı arasındaki ilişki Pearson korelasyon katsayısı ile değerlendirildiğinde $r=0.12$ olup, anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Son zamanlarda yapılan bazı araştırmalar, toprağa %2 ve %10 konsantrasyonlu düşük yoğunluklu polietilen ile kirlenmesinin toprağın elektrik iletkenliğini önemli ölçüde değiştirmediğini bildirmiştir [70, 71].

Toprak örneklerinin organik madde muhtevasının az veya zengin olduğu tespit edilmiştir. Toprak organik maddesi ve toprakta tespit edilen mikroplastik sayısı arasındaki ilişki Pearson korelasyon katsayısı ile değerlendirildiğinde $r=0.04$ olup, anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Organik madde miktarına göre gruplanan toprak örneklerindeki mikroplastik sayıları arasında ANOVA testi ile yapılan istatistiksel değerlendirme sonucunda anlamlı bir fark tespit edilememiştir ($p=0.75$ olup $p>0.05$ 'tir). Ancak organik maddece zengin olan toprak örneklerindeki mikroplastik sayılarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. %3-5 organik madde içeren toprak örneklerindeki mikroplastik sayısı ortalama değer olan 120 MP/kg değerini aşarak 340 MP/kg değerine ulaşmıştır. Bazı çalışmalarda organik madde ve mikroplastik miktarı arasında pozitif bir korelasyon olduğu bunun sebebinin ise muhtemelen organik maddenin artışının mikroorganizma

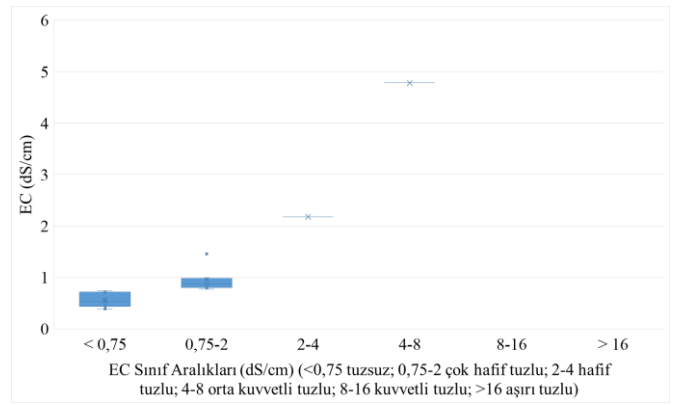
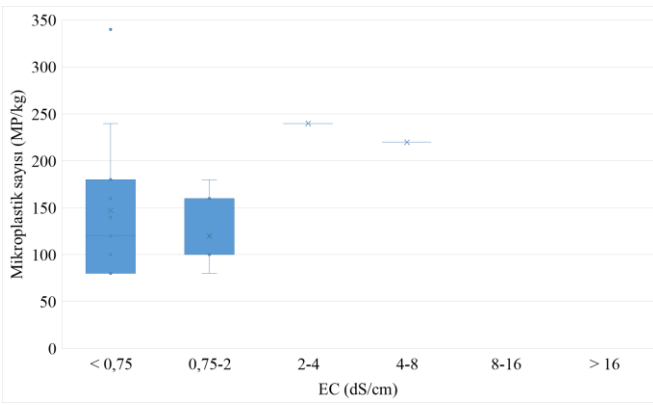
aktivitelerine teşvik etmesi ve böylece mikroplastikleri parçalamasının artması ile açıklanmıştır [72].

Toprak örneklerinin fosfor içeriğinin az, orta veya çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Toprak fosforu ve toprakta tespit edilen mikroplastik sayısı arasındaki ilişki Pearson korelasyon katsayısı ile değerlendirildiğinde $r=0.56$ olup, orta düzeyli korelasyon tespit edilmiştir. Fosfor miktarına göre gruplanan toprak örneklerindeki mikroplastik sayıları arasında ANOVA testi ile yapılan istatistiksel değerlendirme sonucunda anlamlı bir fark tespit edilememiştir ($p=0.29$ olup $p>0.05$ 'tir). Toprakta tespit edilen bitkiye elverişli fosfor miktarı arttıkça tespit edilen mikroplastik sayısı da artmıştır. Bu durum toprakta bitkiye elverişli fosfor miktarı artışının mikroorganizma aktivitelerini teşvik etmesi ve böylece mikroplastikleri parçalamasının artması ile açıklanabilir.

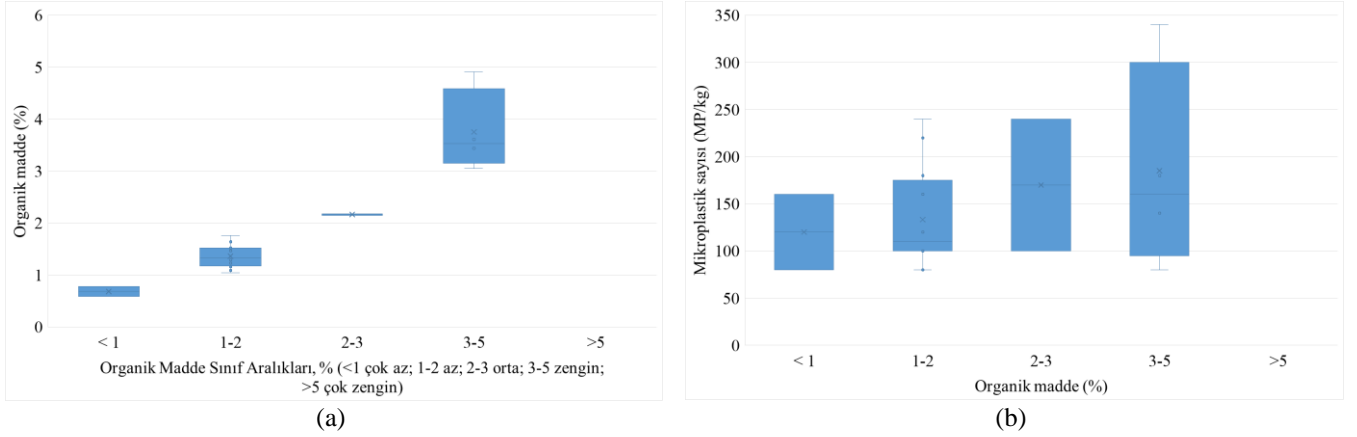
Toprak örneklerinin potasyum değerlerinin yeterli düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Toprak potasyumu ve toprakta tespit edilen mikroplastik sayısı arasındaki ilişki Pearson korelasyon katsayısı ile değerlendirildiğinde $r=0.36$ olup, zayıf korelasyon tespit edilmiştir. Bu ilişki de potasyumun mikroorganizma aktivitelerini teşvik etmesi ve böylece mikroplastikleri parçalamasının artması ile açıklanabilir. Potasyum miktarına göre analizi yapılan toprak örneklerinin tümü >30 kg/da değerinde toplanmış olup kıyaslanabilir gruplar oluşmamıştır.



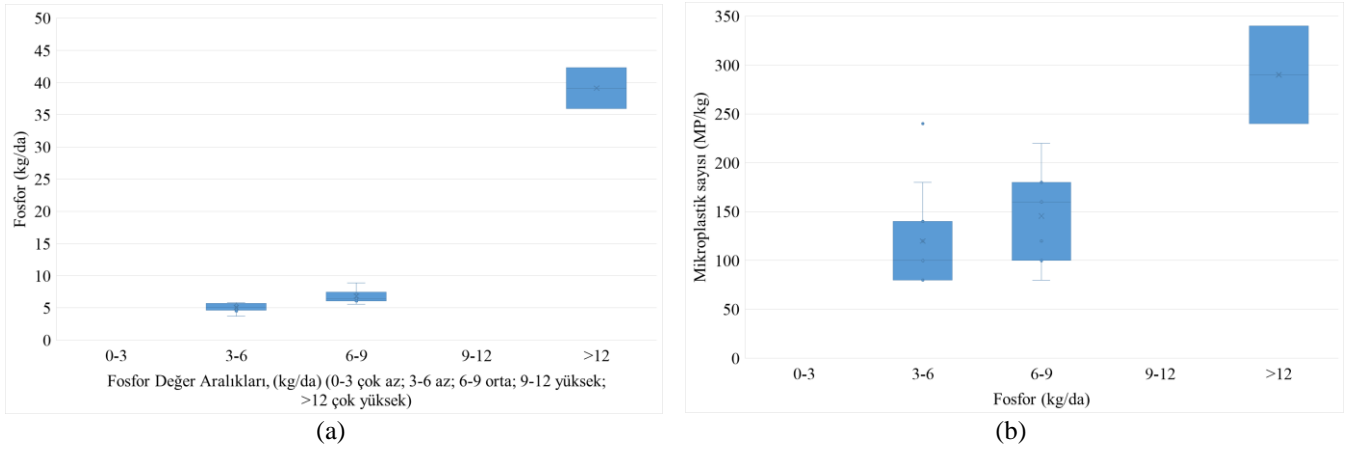
Şekil 11. Toprak örneklerinin pH değeri ve mikroplastik dağılımı



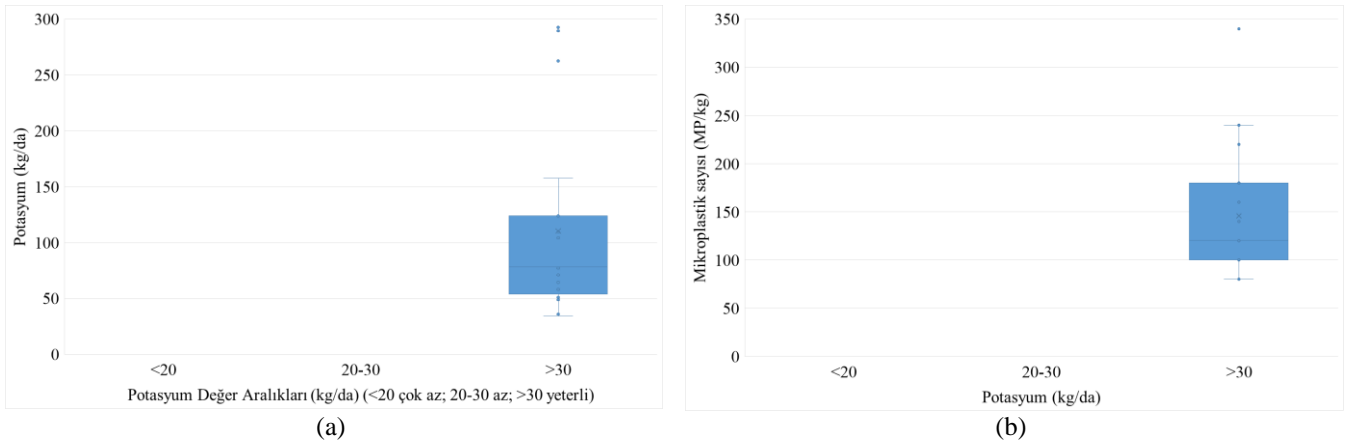
Şekil 12. Toprak örneklerinin EC değeri ve mikroplastik dağılımı



Şekil 13. Toprak örneklerinin organik madde (OM) değeri ve mikroplastik dağılımı



Şekil 14. Toprak örneklerinin fosfor değeri ve mikroplastik dağılımı



Şekil 15. Toprak örneklerinin potasyum değeri ve mikroplastik dağılımı

4. Sonuçlar

Plastik kirliliği günümüzde insanlığın yüzleşmek zorunda olduğu en önemli çevre sorunlarından birisidir. Mikroplastiklerin sucul ortamlar kadar toprakta da yayıldığı ve ekolojik bir risk oluşturduğunun farkına varılması gerekir.

Bu çalışma ülkemizde karasal ekosistemde mikroplastik kirliliğinin tespitine ilişkin ilk çalışmalardan biridir. Araştırma sonucunda örnekleme yapılan tüm numunelerde mikroplastik kirliliği olduğu tespit edilmiştir. Toprakta mikroplastik kaynaklarına ilişkin olarak yapılacak olan daha kapsamlı bir çalışmanın ilk basamağı olan bu çalışmada,

Konya İli ve yakın çevresinden alınan 20 toprak örneğinde 80-340 MP/kg arasında mikroplastik tespit edilmiştir. Toprak örneklerinde %45 fiber (1300 MP); %25 pellet (720 MP); %18 film (540 MP); %7 fragment (200 MP) ve %5 köpük (160 MP) tespit edilirken %51 oranla en fazla şeffaf renkli mikroplastığe rastlanmıştır. Polimer tipinden bağımsız olarak yapılan risk analizi sonucunda 1, 2 ve 8 numaralı numunelerde CF değerinin önemli ekolojik risk oluşturduğu, diğer numuneler için orta seviyede ekolojik risk olduğu tespit edilmiştir. PLI değerine göre numunelerin tümü için düşük risk olduğu tespit edilmiştir. Toprak örneklerinin killi-tınlı ve tınlı özellikte oldukları belirlenmiştir. Toprak pH, EC ve organik madde muhtevası ile mikroplastik sayıları arasında anlamlı bir korelasyon tespit edilmezken, fosfor ile orta düzeyli ($r=0.56$) ve potasyum ile zayıf düzeyli ($r=0.36$) korelasyon tespit edilmiştir. Bu ilişki, minerallerin mikroorganizma aktivitelerini teşvik etmesi ve böylece plastikleri mikroplastiklere parçalamasının artışı ile açıklanmıştır. Yapılan araştırmalar mikroplastiklerin varlık ve birikiminin topraktaki çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri etkileyebileceğini ve toprak ekosistemi işleyişi için bunların son derece önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle konuyla ilgili araştırmalar derinleştirilmelidir. Öte yandan literatürdeki yayınlar incelendiğinde mikroplastiklerin örnekleme ve analizine ilişkin standart bir metod olmaması, sonuçların yorumlanmasını güçleştirmektedir. Mikroplastiklerin tarım topraklarına girişi için pek çok yol bulunmaktadır. Bu çalışmanın bir sonraki basamağında mikroplastiklerin toprağa giriş faktörlerinin tespit edileceği kontrollü örnekleme yapılacaktır. Tarım topraklarında mikroplastik kirlilik seviyesinin ve bu kirliliğin ekolojik risklerinin tespiti plastik kaynaklarının kontrolü için önemli bir adımdır

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] Y. Yan and Z.F. Yang, Sources, distribution, behavior, and detection techniques of microplastics in soil: A review. *China Geology*, 6, 695-715, 2023. <https://doi.org/10.31035/cg2023042>.
- [2] R.C. Thompson, Y. Olsen, R.P. Mitchell, A. Davis, S.J. Rowland, A.W.G. John, D. McGonigle and A.E. Russell Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304, 838, 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.
- [3] M. Rilling, Microplastic in Terrestrial Ecosystems and the Soil? *Environmental Science & Technology*, 46(12), 2012. <https://doi.org/10.1021/es302011r>.
- [4] L. Nizzetto, S. Langaas and M. Futter, Pollution: do microplastics spill on to farm soils? *Nature*, 537, 488, 2016. ISSN 1476-4687. <https://doi.org/10.1038/537488b>.
- [5] E. Bergami, E. Rota, T. Caruso, G. Birarda, L. Vaccari and I. Corsi, Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus*. *Biology Letters*, 16, 2020. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2020.0093>.
- [6] B. Basaran, Z. Özçiftçi, E.D. Kanbur, H.T. Akçay, S. Gül, Y. Bektaş and U. Aytan, Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 135, 106646, 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>.
- [7] Y. Li, L. Peng, J.X. Fu, X.L. Dai and G.Q. Wang, A microscopic survey on microplastics in beverages: the case of beer, mineral water and tea. *Analyst*, 147(6), 1099-1105, 2022. <http://dx.doi.org/10.1039/d2an00083k>.
- [8] A. Tahir, P. Taba, M.F. Samawi and S. Werorilangi, Microplastics in water, sediment and salts from traditional salt producing ponds. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(4), 431-440, 2019. <http://dx.doi.org/10.22034/gjesm.2019.04>.
- [9] M. Blasing and W. Amelung, Plastics in soil: analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment*, 612, 422-435, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>.
- [10] S. Allen, D. Allen, V.R. Phoenix, G. Le Roux, P.D. Jimenez, A. Simonneau, S. Binet and D. Galop, Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12, 339-344, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0409-4>.
- [11] G.S. Zhang and F.X. Zhang, Variations in aggregate-associated organic carbon and polyester microfibrils resulting from polyester microfibrils addition in a clayey soil. *Environmental Pollution*, 258, 113716, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113716>.
- [12] D.F. He, Y.M. Luo, S.B. Lu, M.T. Liu, Y. Song and L.L. Lei, Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 109, 163-172, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006>.
- [13] G.S. Zhang and Y.F. Liu, The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of The Total Environment*, 642, 12-20, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>.
- [14] X. Li, L. Chen, Q. Mei, B. Dong, X. Dai, G. Ding and E.Y. Zeng, Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water Research*, 142, 75-85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.034>.
- [15] F. Corradini, P. Meza, R. Eguluz, F. Casado, E. Huerta-Lwanga and V. Geissen, Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671, 411-420, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>.
- [16] G.S. Zhang and Y.F. Liu, The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12-20, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>.

- [17] L. Nizzetto and M. Futter, S. Langaas, Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science and Technology*, 50(20), 10777–10779, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>.
- [18] R.W. Chia, J.Y. Lee, J. Jang, H. Kim and K.D. Kwon, Soil health and microplastics: a review of the impacts of microplastic contamination on soil properties. *Journal of Soils Sediments*, 22, 2690–2705, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03254-4>.
- [19] Y. Qiu, S. Zhou, C. Zhang, Y. Zhou and W. Qin, Soil microplastic characteristics and the effects on soil properties and biota: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 313, 120183, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120183>.
- [20] S. Zhao and J. Zhang, Microplastics in soils during the COVID-19 pandemic: Sources, migration and transformations, and remediation technologies. *Science of the Total Environment*, 883, 163700, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163700>.
- [21] L. Fu, J. Li, G. Wang, Y. Luan and W. Dai, Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112207>.
- [22] M. Arienzo, L. Ferrara and M. Trifuoggi, The dual role of microplastics in marine environment: Sink and vectors of pollutants. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9060642>
- [23] K. Cverenkova, M. Valachovicova, T. Mackulak, L. Zemlicka and L. Birosova, Microplastics in the Food Chain. *Life*, 11 (12), 1349, 2021. <https://doi.org/10.3390/life11121349>.
- [24] R.W. Chia, J.Y. Lee, M. Lee, G.S. Lee and C.D. Jeong, Role of soil microplastic pollution in climate change. *Science of the Total Environment*, 887, 164112, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164112>.
- [25] M.O. Akça, S. Gündoğdu ve O.C. Tugay, Çilek üretiminde plastik malç uygulamasından kaynaklı toprakta plastik birikiminin belirlenmesi, *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 10 (2), 165-176, 2022. <https://doi.org/10.33409/tbbd.1185820>.
- [26] M. Ulvi and S. Aydın, Microplastic and associated polyaromatic hydrocarbons in surface waters feeding Beyşehir lake in Türkiye. *Global NEST Journal*, 25(7) 91-98, 2023. <https://doi.org/10.30955/gnj.004960>.
- [27] M.B. Duygu, B. Kirmencioğlu and M. Aras, Essential Tools to Establish a Comprehensive Drought Management Plan - Konya Basin Case Study. *Turkish Journal of Water Science & Management*, 1 (1), 54-70, 2017. <https://doi.org/10.31807/tjwsm.297087>.
- [28] L. Li, Y. Luo, R. Li, Q. Zhou, W.J.G.M. Peijnenburg, N. Yin, J. Yang, C. Tu and Y. Zhang, Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Natura Sustainability*, 3, 929–937, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>.
- [29] B. Chai, Q. Wei, Y. She, G. Lu, Z. Dang and H. Yin, Soil microplastic pollution in an e-waste dismantling zone of China. *Waste Management*, 118, 291-301, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.048>
- [30] L. Cao, D. Wu, P. Liu, W. Hu, L. Xu, Y. Sun, Q. Wu, K. Tian, B. Huang, S.J. Yoon, B.O. Kwon and J.S. Khim, Occurrence, distribution and affecting factors of microplastics in agricultural soils along the lower reaches of Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 794, 148694, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148694>.
- [31] L. Yang, Y. Zhang, S. Kang, Z. Wang and C. Wu, Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of the Total Environment*, 780, 146546, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146546>.
- [32] J. Masura, J. Baker, G. Foster, C. Arthur, C. Herring and T. Editor, Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48, 2015. <http://dx.doi.org/10.25607/OB-P-604>.
- [33] ISO 11464:2006 Soil quality - Pretreatment of samples for physico-chemical analysis. <https://www.iso.org/standard/37718.html>, Accessed 10 January 2024.
- [34] G.J. Bouyoucos, Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal*. 54, 464–465, 1962. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>.
- [35] M.L. Jackson, *Soil Chemical Analysis*. Prentice-Hall Inc. Englewood, Cliffs. NY. 1962. <https://doi.org/10.1002/jpln.19590850311>.
- [36] D.W. Nelson and L.E. Sommers, Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H. and Kenney, D.R., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 2*, American Society of Agronomy, 539-579, 1982. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>.
- [37] EN 16169: Sludge, treated biowaste and soil - Determination of Kjeldahl nitrogen, 2012. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen>, Accessed 10 January 2024.
- [38] S.R. Olsen, C.V. Cole, F.S. Watanabe and L.A. Dean, Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate, USDA Circular No. 939, US Government Printing Office, Washington DC, 1954.
- [39] M.O. Rodrigues, A.M.M. Gonçalves, F.J.M. Gonçalves, H. Nogueira, J.C. Marques and N. Abrantes, Effectiveness of a methodology of microplastics isolation for environmental monitoring in freshwater systems. *Ecol Indic*, 89, 488–495, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2018.02.038>.
- [40] X. Yang, Z. Wan, J. Xiao, F. Li, F. Zhang and Z. Zhang, Evaluation of niche, diversity, and risks of microplastics in farmland soils of different rocky desertification areas. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133603, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133603>.
- [41] L. Hakanson, An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water*

- Research, 14(8), 975–1001, 1980. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
- [42] A. Hossain, M.I. Adham, M. Hasan, M.M. Ali, M.A.B. Siddique, V. Senapathi and A.R.M.T. Islam, Analysis and risk evaluation of soil microplastics in the Rohingya refugee camp area, Bangladesh: A comprehensive study. *Regional Studies in Marine Science*, 76, 103578, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103578>.
- [43] M. Ranjani, S. Veerasingam, R. Venkatachalapathy, M. Mugilarasan, A. Bagaev, V. Mukhanov and P.J.M.P.B. Vethamony, Assessment of potential ecological risk of microplastics in the coastal sediments of India: a meta-analysis. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 111969, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.111969>.
- [44] B. Zhou, J. Wang, H. Zhang, H. Shi, Y. Fei, S. Huang, Y. Tong, D. Wen, Y. Luo and D. Barceló, Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film. *Journal of Hazardous Materials*, 388, 121814, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814>.
- [45] L. Han, Q. Li, L. Xu, A. Lu, B. Li, W. Gong and J. Tian. Abundance and distribution of microplastics of soils in Daliao River basin. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 174–185, 2020. <http://doi.org/10.33263/BRIAC114.1170011712>.
- [46] M. Liu, S. Lu, Y. Song, L. Lei, J. Hu, W. Lv, W. Zhou, C. Cao, H. Shi, X. Yang and D. He, Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 855-862, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051>.
- [47] L. Ding, X. Wang, Z. Ouyang, Y. Chen, X. Wang, D. Liu, S. Liu, X. Yang, H. Jia and X. Guo, The occurrence of microplastic in Mu Us Sand Land soils in northwest China: Different soil types, vegetation cover and restoration years. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123982, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123982>
- [48] S. Feng, H. Lu, P. Tian, Y. Xue, J. Lu, M. Tang and W. Feng, Analysis of microplastics in a remote region of the Tibetan Plateau: Implications for natural environmental response to human activities. *Science of the Total Environment*, 739, 140087, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140087>.
- [49] Y. Yuchen, Y. Zhang Fang and Y.U. Tao, Sources, ecological hazards and treatment technologies of microplastics in soil. *Geology in China*, 49, 770–788, 2022. <http://doi.org/10.12029/gc20220307>.
- [50] N. Beriot, J. Peek, R. Zornoza, V. Geissen and E.H. Lwanga, Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of the Total Environment*, 755, 142653, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>.
- [51] P. van den Berg, E. Huerta-Lwanga, F. Corradini and V. Geissen, Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. *Environmental Pollution*, 261, 114198, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114198>.
- [52] I.K. Harms, T. Diekötter, S. Troegel and M. Lenz, Amount, distribution and composition of large microplastics in typical agricultural soils in Northern Germany. *Science of the Total Environment*, 758, 143615, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143615>
- [53] J. Alvarez-Lopezello, C. Robles and R.F. del Castillo, Microplastic Pollution in Neotropical Rainforest, Savanna, Pine Plantations, and Pasture Soils in Lowland Areas of Oaxaca, 121. Preliminary results, Mexico, *Ecological Indicators*, 107084, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107084>
- [54] S.K. Kim, J.S. Kim, H. Lee and H.J. Lee, Abundance and characteristics of microplastics in soils with different agricultural practices: Importance of sources with internal origin and environmental fate. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123997, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123997>.
- [55] Y.R. Choi, Y.N. Kim, J.H. Yoon, N. Dickinson and K.H. Kim, Plastic contamination of forest, urban, and agricultural soils: a case study of Yeosu City in the Republic of Korea. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 1962–1973, 2021. <http://doi.org/10.1007/s11368-020-02759-0>.
- [56] J. Crossman, R.R. Hurley, M. Futter and L. Nizzetto, Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment. *Science of the Total Environment*, 724, 138334, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138334>.
- [57] E.D. Paes, T.V. Gloaguen, H.D.D. Silva, T.S. Duarte, M.D. de Almeida, O.D.V. Costa, M.R. Bomfim and J.A.G., Santos, Widespread microplastic pollution in mangrove soils of Todos os Santos Bay, northern Brazil. *Environmental Research*, 210, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112952>.
- [58] Z. Maghsodian, A.M. Sanati, B. Ramavandi, A. Ghasemi and G.A. Sorial, Microplastics accumulation in sediments and *Periophthalmus waltoni* fish, mangrove forests in southern Iran. *Chemosphere*, 264, 128543, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128543>.
- [59] Z. Jia, W. Wei, Y. Wang, Y. Chang, R. Lei and Y. Che. Occurrence characteristics and risk assessment of microplastics in agricultural soils in the loess hilly gully area of Yan' an, China. *Science of The Total Environment*, 912, 169627, 2024. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169627>.
- [60] O. Mbachu, G. Jenkins, P. Kaparaju and C.J. Pratt, The rise of artificial soil carbon inputs: reviewing microplastic pollution effects in the soil environment. *Science of The Total Environment*, 780, 146569, 2021. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146569>.
- [61] G.S. Zhang, F.X. Zhang and X.T. Li, Effects of polyester microfibers on soil physical properties: perception from a field and a pot experiment. *Science of the Total Environment*, 670, 1–7, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.149>.

- [62] A.A. de Souza Machado, C.W. Lau, J. Till, W. Kloas, A. Lehmann, R. Becker and M.C. Rillig, Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science and Technology*, 52, 9656–9665, 2018. <http://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>.
- [63] A. Lehmann, K. Fitschen and M.C. Rillig, Abiotic and biotic factors influencing the effect of microplastic on soil aggregation. *Soil Systems*, 3 (1), 21, 2019. <http://doi.org/10.3390/soilsystems3010021>.
- [64] Y. Yan, Z. Chen, F. Zhu, C. Zhu, C. Wang and C. Gu, Effect of polyvinyl chloride microplastics on bacterial community and nutrient status in two agricultural soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107, 602–609, 2021. <http://doi.org/10.1007/s00128-020-02963-1>.
- [65] J.Y. Lee, M. Raza and K.D. Kwon, Land use and land cover changes in the Haean Basin of Korea: impacts on soil erosion. *Episodes*, 42, 17–32, 2019. <http://doi.org/10.18814/epiiugs/2019/0190003>.
- [66] A. Tomczyk, Z. Sokołowska and P. Boguta, Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191–215, 2020. <http://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.
- [67] N. Bandow, V. Will, V. Wachtendorf and F.G. Simon, Contaminant release from aged microplastic. *Environmental Chemistry* 14, 394–405, 2017. <http://doi.org/10.1071/EN17064>.
- [68] B. Boots, C.W. Russell and D.S. Green, Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground. *Environmental Science and Technology*, 53, 11496–11506, 2019. <http://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- [69] Y. Qi, A. Ossowicki, X. Yang, E.H. Lwanga, F. Dini-Andreote, V. Geissen and P. Garbeva, Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121711, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121711>.
- [70] Y. Qi, N. Beriot, G. Gort, E.H. Lwanga, H. Gooren, X. Yang and V. Geissen, Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties. *Environmental Pollution*, 266, 115097, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115097>.
- [71] R.W. Brown, D.R. Chadwick, H. Thornton, M.R. Marshall, S. Bei, M.A. Distaso, R. Bargiela, K.A. Marsden, P.L. Clode, D.V. Murphy and S. Pagella, Field application of pure polyethylene microplastic has no significant short-term effect on soil biological quality and function. *Soil Biology and Biochemistry*, 165, 108496, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108496>
- [72] F. Zhang, X. Yang and Z. Zhang, Effects of soil properties and land use patterns on the distribution of microplastics: A case study in southwest China, *Journal of Environmental Management*, 356, 120598, 2024. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120598>.





Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-Cu-Mg alaşımlarının mikroyapı ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the microstructure and tribological properties of Al-Cu-Mg alloys produced by powder metallurgy

Murat Beder^{1,*} 

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Al-Cu-Mg alaşımı 450°C (A), 500°C (B) ve 550°C (C) sıcaklıklarında sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Sıcak presleme yöntemi kullanılarak yoğunlaştırılan A, B ve C kodlu numunelerin sıcak pres sonrası mikro yapısı ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda elde edilen mikro yapı incelemelerinde A kodlu numunedeki porozite miktarının B ve C kodlu numunelerdeki porozite oranına göre yüksek olduğu ve artan presleme sıcaklığı ile yoğunluğun doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Buna ek olarak artan pres sıcaklığı ile birlikte iç yapıda bulunan α -Al fazının nispeten daha düzgün ve eş taneler şeklinde yapıya homojen dağıldığı gözlenmiştir. En yüksek sertlik değeri 550°C'de sıcak presleme işlemine tabi tutulan C kodlu numunede elde edilmiştir. Buna göre, C numunesinin sertlik değeri B kodlu numuneye göre %20, A kodlu numuneye göre %26, mikro sertlik değeri ise B kodlu numuneye göre %30 A kodlu numuneye göre %33'lük bir artış sergilemiştir. Ayrıca A, B ve C kodlu numunelerin yoğunluk değerleri sırasıyla, 2.7554, 2.7640 ve 2.7655 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Yapılan sürtünme ve aşınma testlerinden elde edilen hacim kaybı-çevrim sayısı verilerine göre en düşük aşınma direnci A numunesinde, en yüksek aşınma direnci ise C numunesinde elde edilmiştir. Buna göre 25x10³, 50x10³ ve 75x10³ çevrim sayısındaki C kodlu numune A numunesine göre sırasıyla %39, %23 ve %45 daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir. Farklı sıcaklıklarda presleme işlemi yapılan A, B ve C numunelerinin aşınma yüzeylerinin, aşınma parçacıklarının ve bilye yüzeylerinin benzer görüntü sergilediği belirlenmiştir. Buna göre aşınma yüzeyleri sıvama tabakalarından ve soyulmalardan, aşınma parçacıklarının irili ufaklı tozlardan bilye yüzeylerinin ise sıvama tabakalarından meydana geldiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Al-Cu-Mg alaşımı, Sıcak presleme, Sertlik, Mikro yapı, Triboloji

1 Giriş

Metal malzemeler içerisinde alüminyum (Al) ve alaşımları gerek saf gerekse alaşım halinde en çok kullanılan matris malzemeleridir [1-3]. Saf alüminyumun oksijene olan ilgisinden dolayı döküm kabiliyetinin kötü oluşu ve mekanik özelliklerinin düşük olmasından dolayı alaşımlama yapılarak

Abstract

In this study, Al-Cu-Mg alloy was hot pressed at 450°C (A), 500°C (B) and 550°C (C). The microstructure and tribological properties of the samples A, B and C, which were densified by hot pressing method, were investigated after hot pressing. In the microstructure examinations obtained as a result of the experiments, it was determined that the amount of porosity in the sample coded A was higher than the porosity ratio in the samples coded B and C and the density increased in direct proportion with increasing pressing temperature. In addition, with increasing pressing temperature, it was observed that the α -Al phase in the microstructure was relatively more uniform and homogeneously distributed in the structure in the form of equal grains. The highest hardness value was obtained in sample C, which was subjected to hot pressing at 550°C. Accordingly, the hardness value of sample C increased by 20% compared to sample B, 26% compared to sample A, and the microhardness value increased by 30% compared to sample B and 33% compared to sample A. In addition, the density values of specimens A, B and C were determined as 2.7554, 2.7640 and 2.7655 g/cm³, respectively. According to the volume loss-cycle number data obtained from the friction and wear tests, the lowest wear resistance was obtained in sample A and the highest wear resistance was obtained in sample C. Accordingly, at 25x10³, 50x10³ and 75x10³ cycles, sample C exhibited 39%, 23% and 45% higher wear resistance than sample A, respectively. It was determined that the wear surfaces, wear particles and ball surfaces of specimens A, B and C, which were pressed at different temperatures, exhibited a similar appearance. Accordingly, it was observed that the wear surfaces consisted of smearing layers and delamination, the wear particles consisted of large and small debris and the ball surfaces consisted of smearing layers.

Keywords: Al-Cu-Mg alloy, Hot pressing, Hardness, Micro structure, Tribology

özellikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır [1-5]. Al alaşımlarının yaygın olarak kullanılma sebeplerinin başında dayanım/özgül ağırlık oranının yüksek olması, elektrik iletkenliği/özgül ağırlık oranının yüksek olması, korozyon dirençlerinin yüksek olması ve plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olması gelmektedir [4-10]. Literatür

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muratbeder@gumushane.edu.tr (M. Beder)
Geliş / Received: 04.11.2024 Kabul / Accepted: 09.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1578819

kapsamında yapılan çalışmalara bakıldığında Al alaşımları arasında en yaygın kullanıma sahip alaşım grubunun Al-Cu-Mg alaşımları olduğu göze çarpmaktadır [1-5, 10-12]. Esas olarak alüminyum, bakır ve magnezyumdan oluşan bu alaşım, 2xxx serisinin iyi bilinen bir ısıl işlem alaşımıdır [1-5, 10]. Al-Cu-Mg alaşımı, uçak endüstrisinde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Al-Cu-Mg, uçak gövdesinde, uçak kanatlarında, dümende, uçak egzoz borularında, uçak kapılarında, zeminlerinde ve diğer havacılık bileşenlerinde, koltuklarda, motor türbinlerinde ve uçak kokpitinde kullanılan bazı parçalarda kullanılır [2, 3, 10-15]. Yukarıda bahsedildiği gibi Al alaşımlarının döküm kabiliyetlerinin kötü olması ve mekanik özelliklerinin düşük olması bu alanda farklı yöntemlerin kullanımına sebep olmuştur. Bu yöntemlerin başta gelenlerinden birisi toz metalürjisi (TM) yöntemidir.

Toz metalürjisinde küçük parçacıklar bir araya gelmesi ile presleme ve yüksek sıcaklık uygulanarak parça imalatı yapılmaktadır [16-19]. Bu küçük parçacıklara örnek olarak saf metallere, alaşımlar ve seramikler verilebilir [18-20]. Söz konusu bu parçacıklar basınç altında şekillendirilmeye uygundur. Sonraki adımda bu parçacıklara ana malzemenin ergime noktasının altında bir sıcaklıkta basınç uygulanarak yoğunlaşmanın istenilen ölçüde olması sağlanmaktadır [18-20]. Toz metalürjisinde düşük maliyetlerle karmaşık parçaların imalatı gerçekleştirilebilmektedir [20-22]. Ayrıca bu yöntem ile malzeme sarfiyatı en aza indirilebilmektedir [20-22].

Toz metalürjisi yapılırken olması istenen parçanın ölçülerindeki kalıba toz koyulur. Sonraki adımda tozların birbiriyle etkileşimini sağlamak adına ön yükleme uygulanır. Bu etkileşimin (bağlanmanın) daha efektif olması adına sıkıştırılan tozlara faz difüzyonunun gerçekleşmesi için ana fazın ergime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta ısıl işlem uygulanır. Toz metalürjisi yönteminde ergime ya da kalıba döküm işlemleri olmadığı dolayısıyla maliyet en aza indirilmiş olur [18-22].

TM yöntemi döküm yönteminde olduğu gibi bir ergime işleminin olmayışı istenmeyen reaksiyonların gerçekleşmesine engel teşkil etmektedir. Bu yüzden bu yöntem daha çok kompozit malzeme üretiminde yüksek oranlarda takviye içeren malzemelerde etkin olarak kullanılmaktadır [18-22].

Literatür kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde, Akopyan ve diğerleri, [23] sıcaklığı $515 \pm 5^\circ\text{C}$, basınç değeri 100 MPa, tutma süresi 3 saat olan sıcak pres uygulaması alüminyum matrisli Al-Si-Cu kompozit alaşımından yapılmış dökümlerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak alaşımın mukavemetinin 335'ten 360 MPa'a, bağıl uzamanın $\sim\%35$ (2,0'den $\%2,8$ e) oranında arttığını ve mekanik özelliklerin belirgin şekilde iyileştiğini belirlenmişlerdir.

Teng ve diğerleri [24] Al ve Cu arasındaki difüzyon bağlaması sıcak presleme (HP) yöntemiyle başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık 500°C olduğunda, 50 MPa'lık bir işleme basıncıyla 3 saat boyunca tutulduğunda, Al ve Cu, birkaç difüzyon katmanından oluşan ara yüzüyle bağlandı sonucuna varılmıştır.

Ammar ve diğerleri [25] sıcak preslemenin Al-Si-Cu-Mg döküm alaşımının yorulma ömrü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüzey gözenekliliği, sıcak preslenmemiş numunelerin yorulma ömrü üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirlenmiştir. Sıcak preslemenin, gözenekliliği ortadan kaldırarak ve/veya gözeneklerin boyutunu azaltarak numunelerin yorulma ömrünü önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir.

Zhao ve arkadaşlar [26], bir çalışmada, Al-Si-Cu alaşımlarının mikro yapısını ve özelliklerini iyileştirmek için hızlı katılaştırma/toz metalürjisi ile sıcak ekstrüzyonun birleşimine dayanan yeni bir yöntem önermiştir. Ekstrüde edilmiş Al-Si-Cu alaşımının faz bileşimi, mikro yapısı ve mekanik özellikleri sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, ekstrüde işlemi Al-Si-Cu alaşımının yoğunluğunu iyileştirirken gözenekliliği önemli ölçüde azaltmıştır. Ekstrüde edilmiş alaşımın çekme mukavemeti ve uzama değerleri, ekstrüde edilmemiş alaşımın değerlerinden çok daha büyüktür. Önerilen yöntemin kullanımı, geleneksel döküm yöntemine göre Al-Si-Cu alaşımının mekanik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmiştir.

Suresh ve arkadaşları [27] ise yaptıkları çalışmada Al-Si-Mg alaşımlarının dökülmüş ve kompozit durumundaki aşınma davranışlarını 600-2400 m kayma mesafesi aralığında incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda artan kayma mesafesiyle aşınma kaybının arttığını ve 2400 m sonundaki ağırlık kaybının 600 m kayma mesafesi sonunda oluşan ağırlık kaybından 1.2 kat daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Literatür kapsamında yapılan diğer birkaç çalışmada Alüminyum alaşımları üzerine aşınma davranışı ve ısıl işlem özellikleri incelenmiştir [28-30]. Bu çalışmalara göre Al-Cu-Mg 'nin akma dayanımı ve basma dayanımı, sırasıyla $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında yaklaşık 698-712 MPa değerine ulaşmış olup, bu değerler iri taneli Al-Cu-Mg (T6) alaşımına göre önemli ölçüde daha yüksektir. Al-Cu-Mg alaşımı üzerinde yapılan aşınma deneylerinde, 0,3'lük bir sürtünme katsayısı ve $\sim 12 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^2$ bir aşınma oranı tespit edilmiştir. Bu değer Al-Cu-Mg (T6) durumuna göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir [28-30].

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Cu-Mg tozlarının sabit basınç değerinde değişken sıcaklıklarda preslenmesi sonucu mikro yapı, sertlik ve tribolojik özelliklerinin karşılaştırılması yapılarak literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

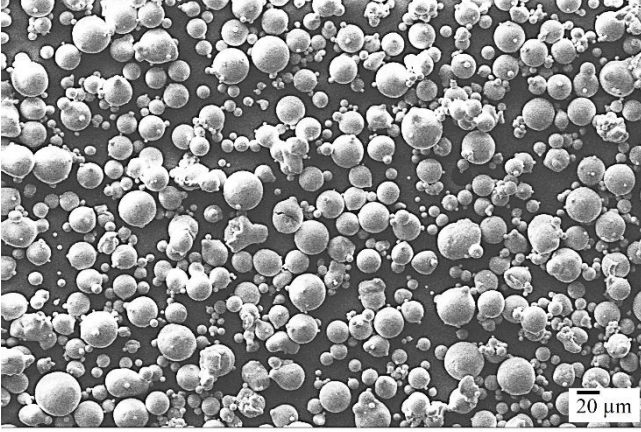
2 Materyal ve metod

Bu çalışmada Al-Cu-Mg alaşımı (ortalama parçacık boyutu 30-40 μm) ABD'den Alfa Aesar isimli firmadan temin edilmiştir.

Tablo 1'de Al-Cu-Mg alaşımının kimyasal bileşimi, Şekil 1'de ise, Al-Cu-Mg alaşım tozlarına ait toz morfolojileri verilmiştir.

Tablo 1. Al-Cu-Mg alaşımına ait kimyasal kompozisyon

Alaşım	Kimyasal bileşim (% ağırlık)									Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)
	Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	
Al-Cu-Mg	0.374	0.385	4.85	0.042	0.312	1.78	0.138	0.005	Kalan	2.77

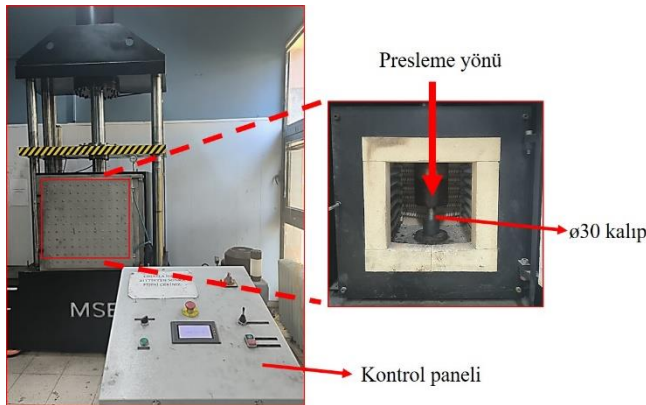


Şekil 1. Al-Cu-Mg tozlarına ait başlangıç morfolojisini gösteren SEM fotoğrafı

Şekil.1 incelendiğinde Al-Cu-Mg partiküllerin nispeten küresel bir morfolojiye sahip oldukları açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Değişken SP parametreleri kullanılarak üretilen Al-Cu-Mg alaşımının üretim parametreleri Tablo 2’de, bu işlemleri gerçekleştirmek için kullanılan sıcak pres (SP) makinesi ise Şekil.2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Al-Cu-Mg alaşımına ait SP parametreleri

Numune kodu (Al-Cu-Mg)	SP		
	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Süre (saat)
A	450		
B	500	500	3
C	550		



Şekil.2. Sıcak presleme makinesi

Sıcak presleme işlemleri vakum ortamında, MSE marka zaman ayarlı sıcak presleme makinesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin nihai ölçüleri imalattan sonra 30 mm çap ve 15 mm kalınlıktır. Al-Cu-Mg malzemelerine ait mikro yapısal incelemeler için A, B ve C

numuneleri metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Bu metalografik işlemlerden olan dağlama, %5’lik floroborik asit (HBF₄) ile Struers Lectropol cihazında elektrolitik dağlama yoluyla gerçekleştirilmiştir. Alaşımın mikro yapıları Zeiss Axio Observer A1m optik mikroskobu kullanılarak araştırılmıştır. Elementel analiz ise Edax Apex™ Octane Elite EDS System ile belirlenmiştir. Numunelerin mikrosertlik testleri ISO 6507-1:2018 standardına uygun şekilde Struers Duramin A/S DK-2750 cihazı kullanılarak 500 g yük altında gerçekleştirilmiştir. Makro sertlik testleri, Nemesis 9000 test cihazı ile 2.5 mm çapında çelik bilye ve 62.5 kg yük kullanılarak Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Hem mikro sertlik hem de sertlik testlerindeki değerler, doğrusal bir hat üzerinden 5 farklı bölgeden alınan değerlerin ortalamasıyla belirlenmiştir. Sertlik değerlerinin belirlenmesinde ölçüm konumu olarak kenarlardan 2.5 kat iz miktarı uzaklık esas alınmıştır. Buna ek olarak ölçüm yapılan izlerin arasındaki mesafe 3 iz miktarı olarak alınmıştır. Ölçümler 5 sertlik değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunelerin yoğunluk değerleri ise Arşimet yoğunluk prensibi kullanılarak ölçülmüştür.

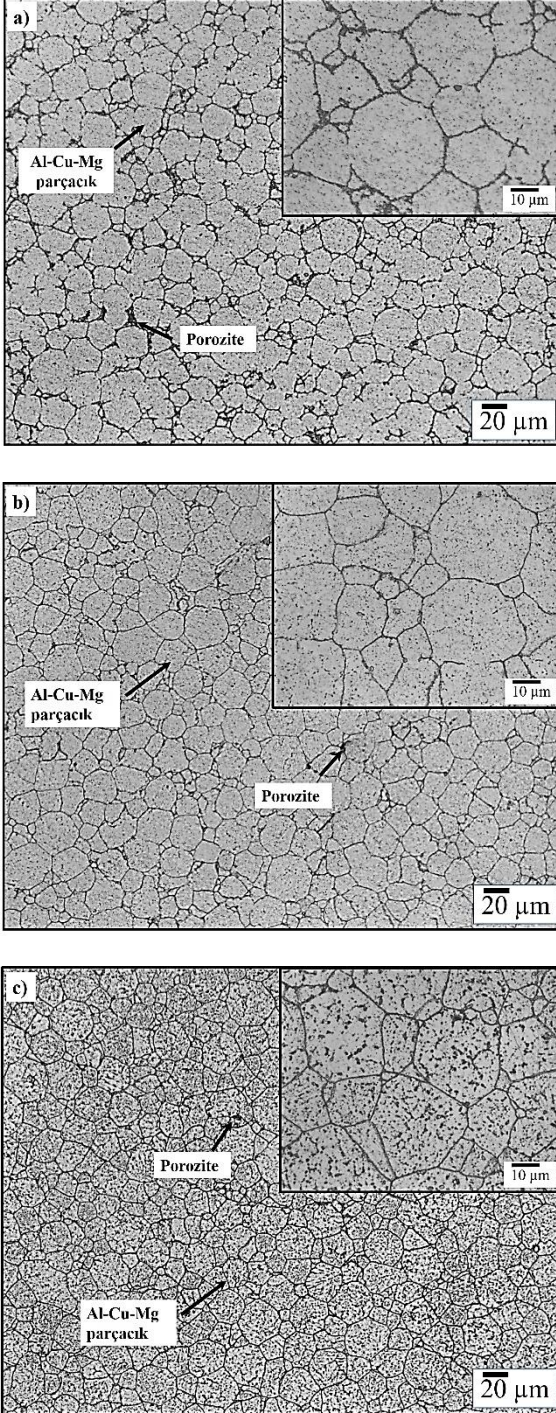
Numunelerin sürtünme ve aşınma özellikleri ASTM:G99 standartlarına göre, plaka üzerinde bilyeli disk tipi UTS Design Tribolog model aşınma cihazı ile ileri geri hareket yaptırılarak belirlenmiştir. Karşı aşındırıcı yüzey olarak 60±2 RSD-C sertliğinde 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş 6 mm çapında bilyeler kullanılmıştır. Her bir sürtünme ve aşınma testinden önce numunelerin yüzeyleri zımparalanmış ve parlatılmıştır. Sürtünme ve aşınma testlerinde, test frekansı, test iz büyüklüğü ve test yükü sırasıyla 4 Hz, 8 mm ve 5 N olarak seçildi. Çevrim sayıları 25x10³, 50x10³ ve 75x10³’dir ve her numune için en az 3 tekrar gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ve aşınma testlerinden önce ve sonra, numune yüzeyleri ultrasonik temizleyicide alkol + aseton karışımı kullanılarak 5 dakika boyunca temizlenmiştir. Sürtünme ve aşınma testleri sonucunda aşınan numunelerin kütle kaybı ±0.01 mg hassasiyete sahip bir terazi ile ölçülmüştür. Hacim kaybı ise ölçülen kütle kayıplarının Arşimet yoğunluk prensibiyle belirlenmiş numune yoğunluğuna bölünmesi ile belirlenmiştir. Sürtünme ve aşınma testleri sonucunda elde edilen toz parçacıkları karbon bant yardımı ile toplanmıştır. Numunelerin SEM fotoğrafları ve EDS ölçümleri, aşınma, toz ve bilye yüzeyleri Zeiss Evo LS10 cihazı kullanılarak incelenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mikroyapı

450°C (A), 500°C (B) ve 550°C (C) sıcaklıklarında sıcak presleme uygulanmış Al-Cu-Mg numunelerinin mikro yapısı Şekil 3(a-c)’de gösterilmiştir. Sıcak presleme ile yoğunlaştırılmış bütün alaşım numunelerinin mikro

yapısında α -Al fazı gözlemlenmiştir. Farklı sıcak presleme sıcaklıklarında üretilen A, B ve C numunelerinin mikro yapıları çoğunlukla eş eksenli ve birbirine benzer tanelerden oluşmuştur ve doku, Şekil 3(a), (b) ve (c)'de gösterildiği gibi net olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca artan sıcak presleme sıcaklığı ile yoğunluğun iyileşmesi α -Al fazının yapı içerisine daha düzgün ve homojen yayılmasına ayrıca porozite miktarının azalmasına neden olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3. Sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg alaşımının mikro yapısını gösteren optik fotoğraflar; (a) 450°C (A), (b) 500°C (B) ve (c) 550°C (C)

Ayrıca, artan sıcak presleme sıcaklığıyla paralel olarak artan difüzyon hızı yoğunlaşmanın daha iyi olmasına, mikro yapıdaki porozite miktarının azalmasına ve artan sıkıştırılabilirlik etkisinden dolayı iç yapının nispeten daha düzenli ve küresel bir şekil almasına neden olmuştur. Nitekim sıcak presleme sıcaklığı artarken yoğunlaşmanın da iyileşmesi beklenen bir durumdur. Bu nedenle artan sıcaklık miktarı poroziteye ters etki ederek en yüksek sıcaklıkta en düşük porozite miktarının olmasına neden olacaktır.

3.2 Yoğunluk ve sertlik

Tablo.3, 450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında sıcak pres uygulaması yapılan A, B ve C kodlu numunelere ait sertlik, mikro sertlik ve yoğunluk değerlerini göstermektedir. Bütün pres sıcaklıklarında sertlik ve mikro sertlik değerleri ile yoğunluk değerleri benzer eğilim sergilemiştir. Sonuç olarak, sertlik ve mikro sertlik değerleri ile alaşımın yoğunluğu artan pres sıcaklığıyla sürekli artmıştır. Buna göre C kodlu numunenin sertlik değeri ile B kodlu numunenin sertlik değeri arasında %20, A kodlu numunenin sertlik değeri arasında ise %26 oranında bir fark belirlenmiştir. C numunesinin mikro sertlik değeri ise B kodlu numuneye göre %30, A kodlu numuneye göre %33'lük bir artış sergilemiştir. Sertlik ve mikro sertlik değerlerindeki artış yoğunlukla ilişkilidir. Nitekim artan sıcak presleme sıcaklığıyla birlikte Al-Cu-Mg alaşımının iç yapısındaki porozite miktarı azalmaktadır. Azalan porozite sertlik değerlerinin artmasına neden olmuş olabilir. Ayrıca artan presleme sıcaklığı alaşım iç yapısındaki difüzyon mekanizmasını hızlandırdığı için Al-Cu-Mg alaşımının iç yapısında bulunan α -Al tanelerinin nispeten daha düzenli ve küresel bir şekil alması sertlik değerlerinin artmasına neden olmuş olabilir. Sonuç olarak yapılan deneylerde C kodlu numunenin yoğunluk değerinin A kodlu numuneye göre %0.3 oranında artış sergilediği belirlenmiştir.

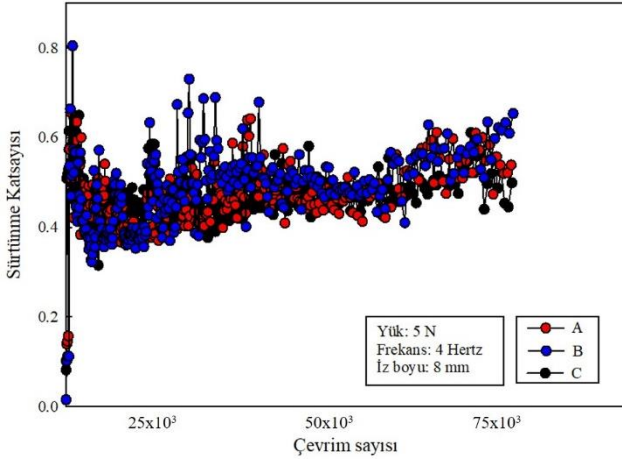
Tablo 3. A, B ve C kodlu numunelere ait sertlik, mikro sertlik ve yoğunluk değerleri

Numune kodu	Yoğunluk (gr/cm ³)	Bağlı yoğunluk (%)	Sertlik (BSD)	Mikrosertlik (VSD)
A	2.75548	99.4758	84.0±2	103.5±1
B	2.76405	99.7855	101.5±2	133.9±2
C	2.76552	99.8384	106.7±3	137.1±4

3.3 Sürtünme ve aşınma deneyleri

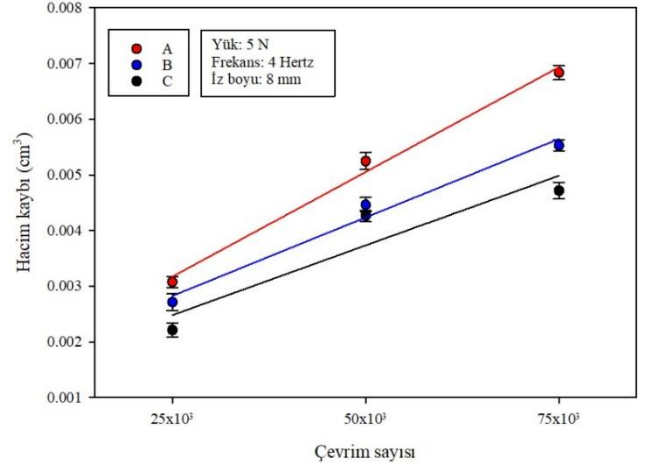
450°C, 500°C ve 550°C'de sıcak presleme işlemine tabi tutulmuş A, B ve C kodlu Al-Cu-Mg alaşımlarının çevrim sayısına göre sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Alaşım numunesinin sürtünme katsayısı test çalışmasının başlangıcında ani bir şekilde artmakta ve belli bir çevrim sayısından sonra kademeli olarak azalmakta ve ardından dalgalanmalarla karakteristiği sergilemektedir. Bu durum tribolojik açıdan değerlendirilebilir. Sürtünme ve aşınma testlerinde yukarıda açıklandığı gibi aşındırıcı olarak bilye kullanılmaktadır. Aşınma testlerinin ilk aşamasında, temas yüzeylerinde bilye-plaka şeklinde bir temas alanı oluşmaktadır. Bu, numune yüzeyinde yüksek basınca ve temas yüzeyleri arasında adezyon bağının oluşmasına neden

olur. Oluşan bu bağlar kaymaya karşı direnç oluşturarak sürtünme katsayısının deneyin başlangıç aşamasında ani bir şekilde artmasına neden olur. Deney devam ettikçe yüzeylerin birbirine alışması ile temas yüzey alanı nispeten artar ve kararlı durum sağlanır. Artan çevrim sayısı numune yüzeyinden kopan parçacıklar bilye yüzeyine sonra tekrar numune yüzeyine sıvanması şeklindeki malzeme transferi sürtünme katsayısında dalgalanmaya neden olur.



Şekil.4. 450°C, 500°C ve 550°C'de, 5 N yükte, 4 Hertz frekansta ve 8 mm iz boyunda sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg alaşımlarının sürtünme katsayısındaki değişim

Sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan 450°C (A), 500°C (B) ve 550°C (C) sıcaklıklarında sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg numunelerine ait hacim kaybı değerlerinin çevrim sayısına göre değişimini gösteren grafik Şekil.5'te verilmiştir. Şekil.5, farklı sıcaklıklarda presleme işlemi yapılan bütün numunelerin hacim kaybı değerlerinin çevrim sayısı ile doğrusal bir şekilde arttığını göstermektedir. Buna göre, bütün çevrim sayıları için en yüksek aşınma direnci C kodlu numunede, en düşük aşınma direnci ise A kodlu numunede belirlenmiştir. Bu durum numunelerin iç yapı, yoğunluk ve sertlik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Artan sıcak presleme sıcaklığı ile numunelerin iç yapısında yoğunlaşmanın daha baskın olduğu belirlenmiştir. Artan yoğunluk ile birlikte numunelerin iç yapısındaki Al-Cu-Mg tozlarının sıkıştırılabilme kabiliyeti artmakta ve porozite oluşumu neredeyse en aza inmektedir. Bu, sürtünme ve aşınma deneylerindeki parçacık kopmasını ve malzeme transferini azaltmaktadır. Buna ek olarak, metallerin aşınma kaybı değerleri Archard aşınma kanunu olarak bilinen $V = kWL/H$ eşitliği ile belirlenir. Bu eşitlikte yer alan W uygulanan yükü, V hacim kaybını, H malzemenin sertliğini, L kayma yolunu (çevrim sayısını), ve k aşınma sabitini göstermektedir. Buna göre çevrim sayısı yani alınan yol ile aşınma kaybı doğru, sertlik değerleri ile ters orantılıdır. Sonuç olarak yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen aşınma verileri Archard eşitliği ile uyum sağlamaktadır. Uygulanan sıcak presleme işleminde de artan sıcaklıkla birlikte sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Dolayısıyla numunelerin hacim kaybı değerleri Archard eşitliği ile uyum sağlamaktadır.



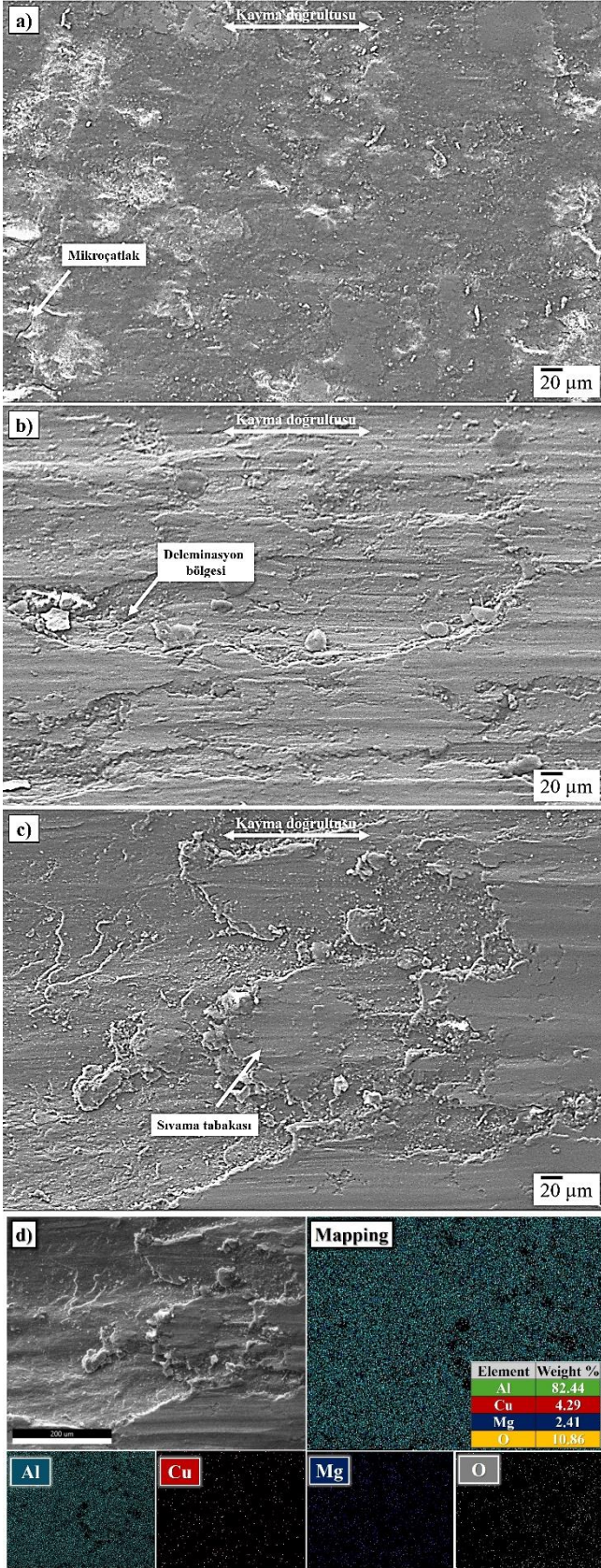
Şekil.5. 550 °C'de, 5 N yükte, 4 Hertz frekansta ve 8 mm iz boyunda sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg alaşımının artan çevrim sayısına göre hacim kaybı değerleri

3.4 Aşınma yüzey görüntüleri

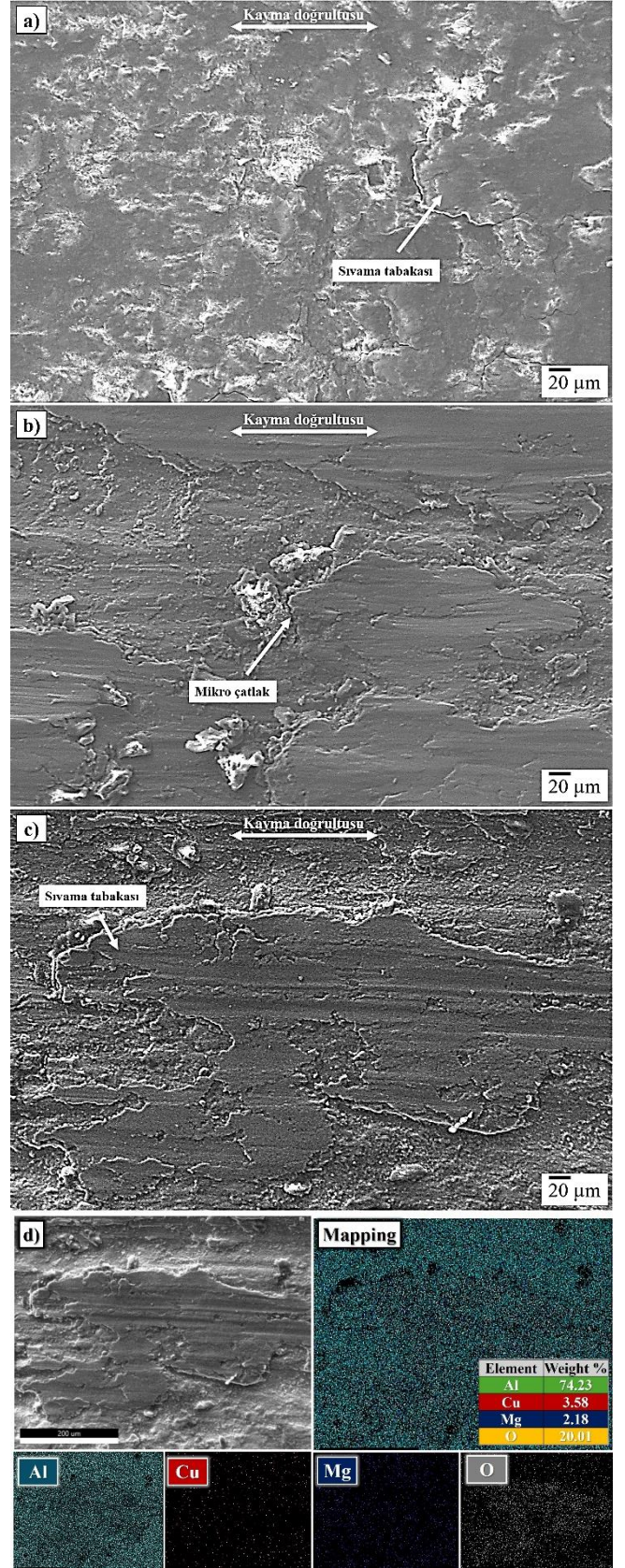
Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemeler sonucunda Al-Cu-Mg alaşımına farklı pres sıcaklıklarında elde edilen A, B ve C kodlu numunelerin aşınma yüzeylerine ve EDS analizlerine ait fotoğraflar Şekil.6-8'de verilmiştir. Buna göre, sıcak presleme işlemi yapılan bütün numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının ve soyulmaların meydana geldiği ayrıca mikro çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Sıvama tabakalarının (Şekil.6a, b ve c) sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda ortaya çıkan aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanması ile oluşmaktadır. Diğer taraftan soyulmaların numune yüzeyinde oluşan mikro çatlakların birleşmesi ile artan sıcaklık etkisinin birleşmesi sonucu sıvama bölgelerinin kırılması ve numune yüzeyinden ayrılması sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

3.5 Aşınma parçacıkları

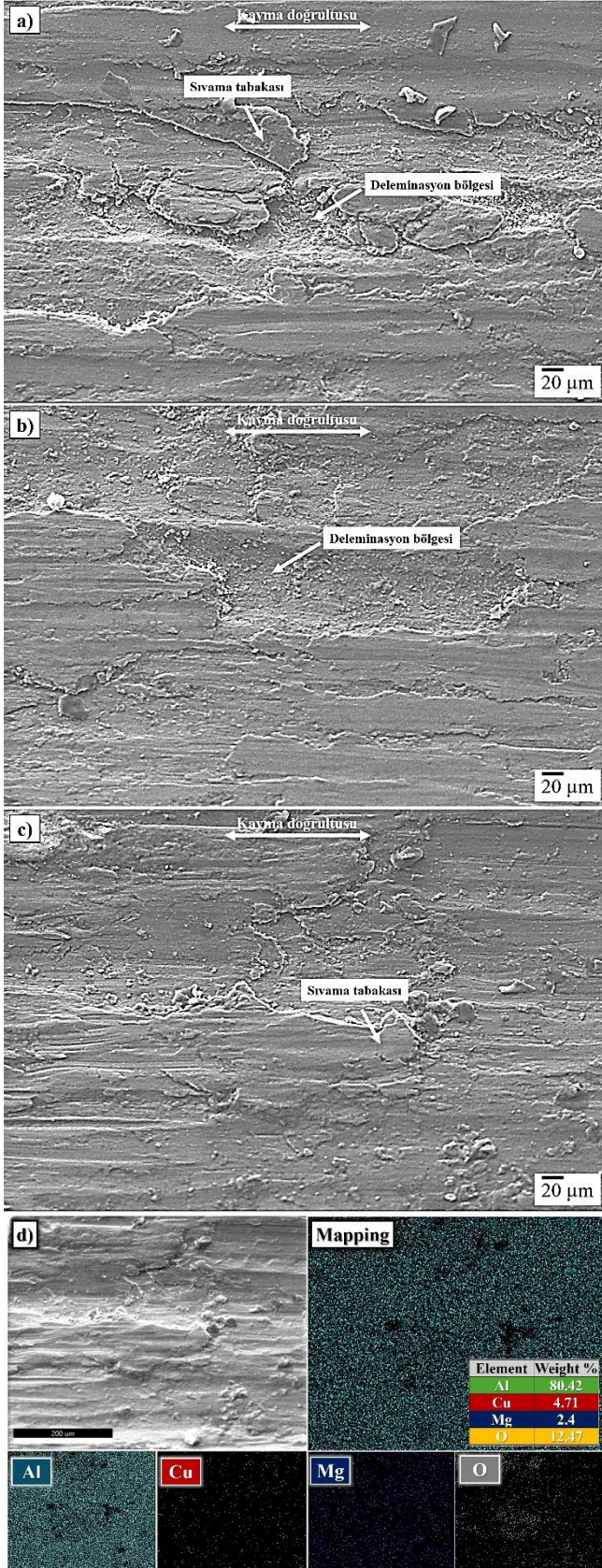
Sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda A, B ve C kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinden elde edilen irili ufaklı aşınma parçacıklarının SEM fotoğrafları Şekil 9-11'de verilmiştir. Artan çevrim sayısı ile toz şeklindeki parçacıkların sayısı artmıştır. Bu numunelerin sertlik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Presleme sıcaklığı arttıkça sertlik değerinde bir artış belirlenmiştir. Artan sertlikle sürtünme ve aşınma deneylerinin başlangıç temas yüzeyi azalmaktadır. Bu durum temas yüzeyleri arasındaki yapışma bağının kuvvetini azaltmaktadır. Hareketin başlangıç aşamasında kesme kuvvetinin etkisiyle temas yüzeyleri arasında kırılmalar gerçekleşir ve aşınma parçacıkları oluşur. Bu parçacıklar deney süresince temas yüzeyleri arasına girerek bilyeye ve numune yüzeyine sıvanırlar. Artan sertlikle birlikte numune yüzeyine sıvama işlemi giderek zorlaşır ve temas yüzeyleri arasında kalan parçacıklar giderek küçülür.



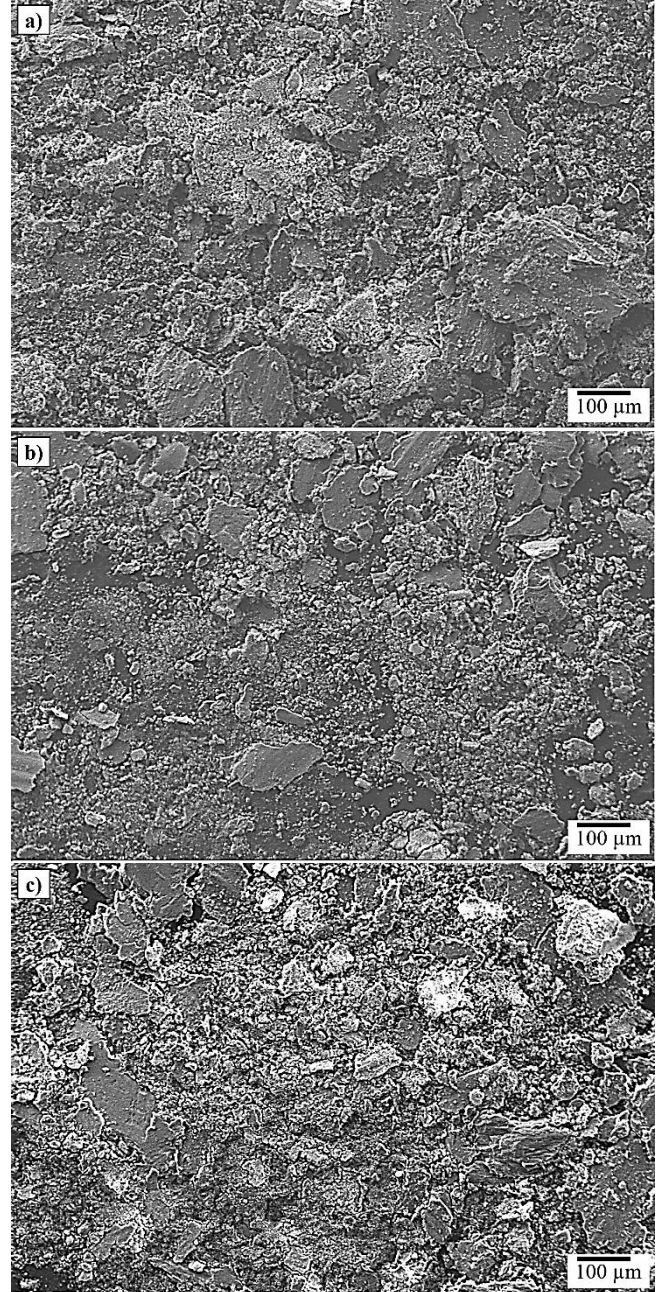
Şekil.6. A kodlu numuneye ait 450°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları; a) 25x10³ çevrim, b) 50x10³ çevrim, c) 75x10³ çevrim ve d) 75x10³ çevrime ait EDS analizi



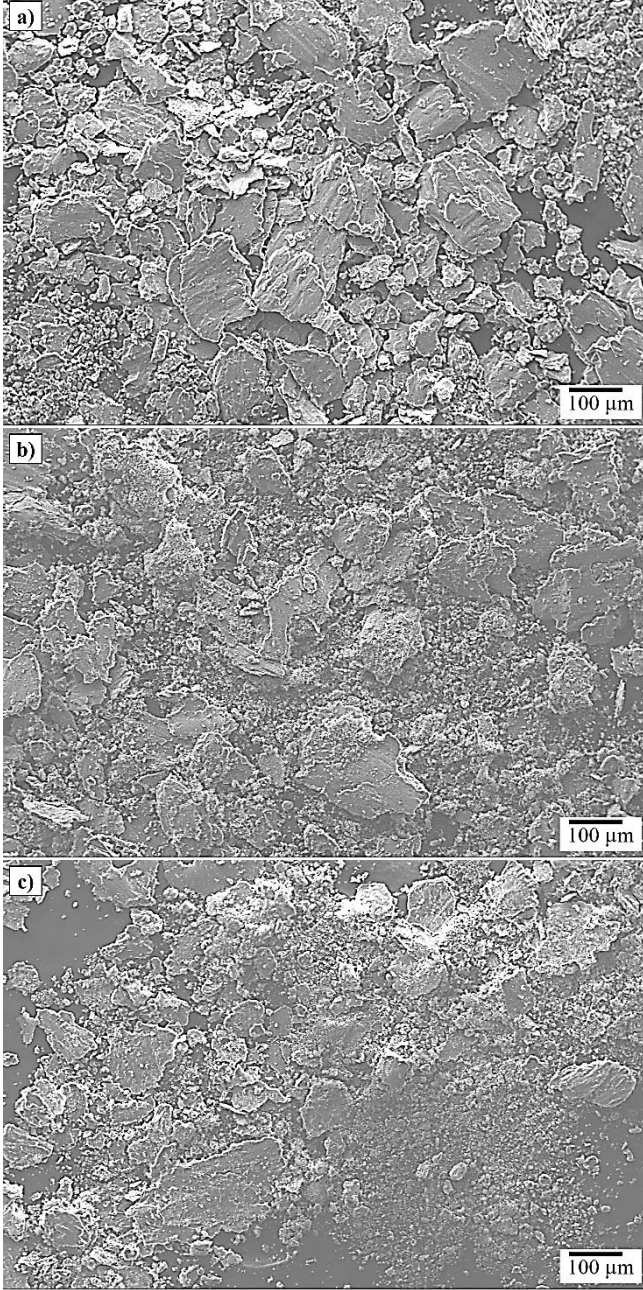
Şekil.7. B kodlu numuneye ait 500°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları; a) 25x10³ çevrim, b) 50x10³ çevrim, c) 75x10³ çevrim ve d) 75x10³ çevrime ait EDS analizi



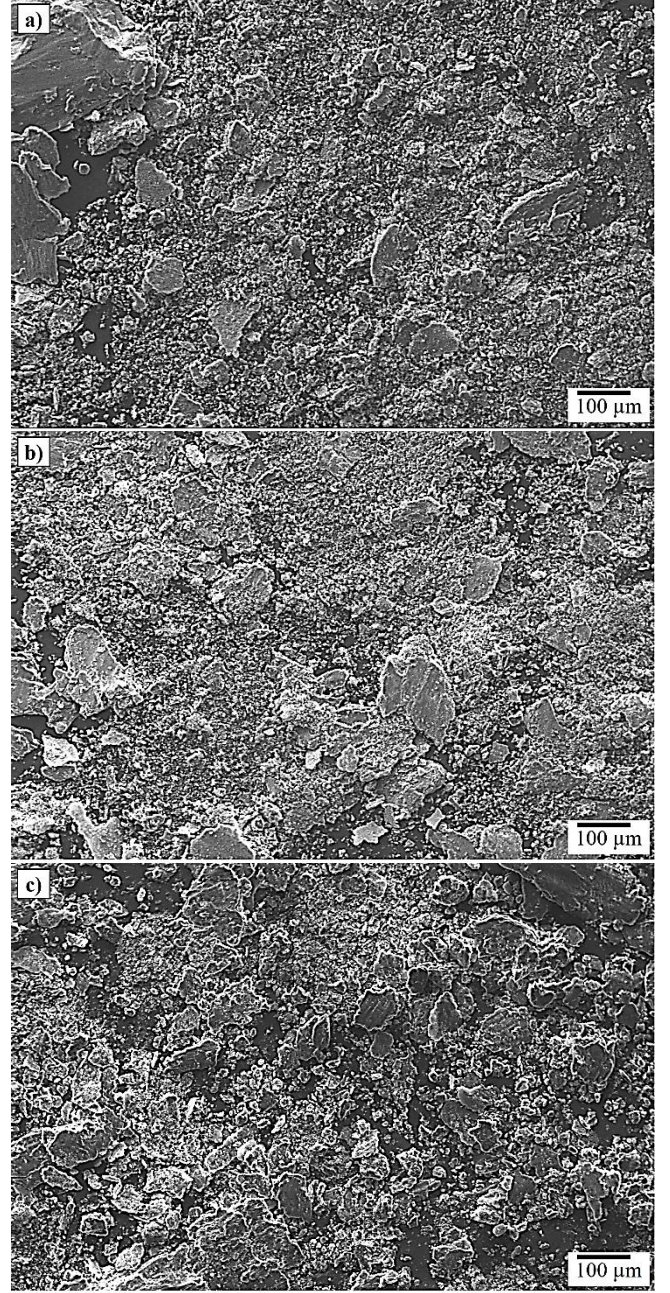
Şekil.8. C kodlu numuneye ait 550°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları; a) 25x10³ çevrim, b) 50x10³ çevrim, c) 75x10³ çevrim ve d) 75x10³ çevrime ait EDS analizi



Şekil.9. A kodlu numuneye ait 450°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinden elde edilen toz parçacıklarının SEM fotoğrafları; a) 25x10³ çevrim, b) 50x10³ çevrim ve c) 75x10³ çevrim



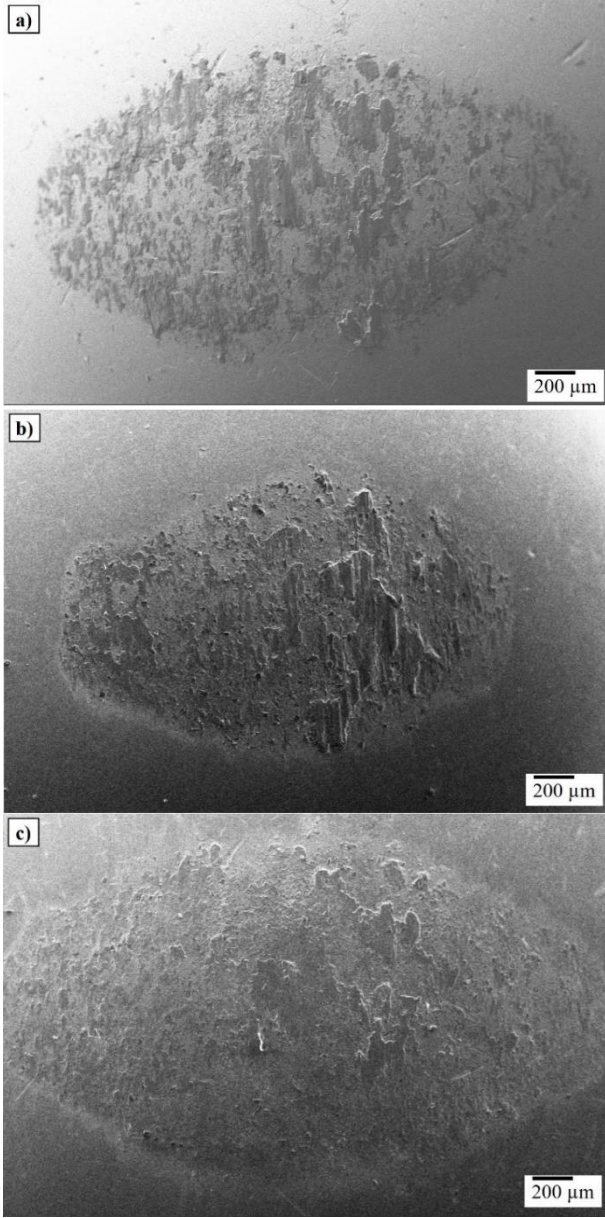
Şekil.10. B kodlu numuneye ait 500°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinden elde edilen toz parçacıklarının SEM fotoğrafları; a) 25×10^3 çevrim, b) 50×10^3 çevrim ve c) 75×10^3 çevrim



Şekil.11. C kodlu numuneye ait 550°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinden elde edilen toz parçacıklarının SEM fotoğrafları; a) 25×10^3 çevrim, b) 50×10^3 çevrim ve c) 75×10^3 çevrim

3.6 Bilye yüzey incelemesi

A, B ve C kodlu numunelere ait aşındırıcı olarak kullanılan 100Cr6 bilyelerin yüzeylerinde benzer tabakaların olduğu belirlenmiştir. Yapılan EDS incelemelerinde bilyenin yüzeyindeki tabakaların Al-Cu-Mg alaşımı olduğu ve oksitlenmelerin meydana geldiği görüldü. Bu duruma örnek olarak A, B ve C kodlu numunelerin 5 N'luk yük, 4 hertz'lik frekans, 8 mm iz boyu ve 50×10^3 'lük çevrim sayısında yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin yüzeyinde oluşan sıvama tabakasının SEM görüntüsü verilmiştir, [Şekil 12](#).



Şekil.12. A,B ve C kodlu numunelere ait 5 N'lük yük, 4 hertz'lik frekans, 8 mm iz boyu ve 50×10^3 'lük çevrim sayısına karşılık gelen aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyelerin SEM görüntüsü

4 Sonuçlar

Elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- 450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında pres uygulaması yapılan A, B ve C kodlu numunelere ait iç yapı incelemelerinde artan sıcaklık miktarı ile birlikte sıkıştırılma kabiliyetinin artması α -Al tanelerinin daha düzgün bir dağılım sergilemesine yol açmıştır.
- A, B ve C kodlu numunelere uygulanan presleme sıcaklığı arttıkça numunelerin yoğunluk değerleri artmıştır. Buna bağlı olarak C kodlu numune A kodlu numuneye göre %0,3 değerinde bir artış göstermiştir. Sonuç olarak porozite miktarı azalmıştır.
- A, B ve C kodlu numunelerde elde edilen sertlik ve mikro sertlik değerlerinin artan presleme sıcaklık miktarı ile

sürekli arttığı belirlendi. Buna göre, en yüksek sertlik ve mikro sertlik değeri sırasıyla A numunesinden %26 ve %33 daha yüksek değer sergileyen C kodlu numune göstermiştir.

- Sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen hacim kaybı-çevrim sayısı verilerine göre en düşük hacim kaybı değeri en yüksek sertlik değerine sahip olan C kodlu numunede gerçekleşmiştir. Buna göre 75×10^3 çevrim sayısındaki A kodlu numuneye karşılık gelen hacim kaybı değeri C kodlu numuneye göre %45 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerin sürtünme ve aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının, mikro çatlakların ve delemantasyon bölgelerinin olduğu ve artan çevrim sayısı ile sıvama ve delemantasyon bölgelerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda numune yüzeyinden toplanan aşınma tozlarının irili ufaklı olduğu gözlenmiştir. Artan çevrim sayısı ve presleme sıcaklığı ile bu tozların büyüklüklerinin nispeten azaldığı belirlenmiştir.
- Sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen aşındırıcı bilye görüntüleri incelendiğinde bilye yüzeyine malzeme transferinin gerçekleştiği, buna bağlı olarak bilye yüzeyinde sıvama tabakalarının olduğu gözlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] S. J. Maddox, Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures. *International Journal of Fatigue*, 25 (12), 1359–1378, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00063-X](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00063-X).
- [2] R.E. Sanders, T.H. Sanders, J.T. Stanley, Relationships Between Microstructure, Conductivity, and Mechanical Properties of Alloy 2024-T4 (II)., *Aluminium*, 59 (2), 143-148, 1983.
- [3] D.G. Altenpohl, Present structure and future trends in key materials industries, *Materials in World Perspective: Assessment of Resources*, 21–126, 1980. https://doi.org/10.1007/978-3-642-81453-2_2.
- [4] G.E. Totten, D.S. Mackenzie, *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*, New York-Basel, 2015.
- [5] M. Gazizov, R. Kaibyshev, Precipitation structure and strengthening mechanisms in an Al-Cu-Mg-Ag alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 702, 29–40, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.110>.
- [6] W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge, Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, *Materials Science and Engineering: A*, 280 (1), 37–49, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X)
- [7] B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler, Application of aluminum and aluminum alloys in engineering, *Applied Engineering Letters*, 3 (2), 52–62, 2018. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2018.3.2.2>

- [8] M. Tisza, Z. Lukács, High strength aluminum alloys in car manufacturing, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 418 (1), 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012033>
- [9] J. Hirsch, Aluminium alloys for automotive application, Materials Science Forum, 242, 33–50, 1997. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.242.33>
- [10] J. Hirsch, Aluminium in innovative light-weight car design, Materials Transaction, 52 (5), 818–24, 2011. <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201132>
- [11] J.P. Adams, History of Powder Metallurgy, Powder Metallurgy, 7, 3–8, 2015. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v07.a0006017>
- [12] J.R. Pickens, Aluminium powder metallurgy technology for high-strength applications, Journal of Materials Science, 16 (6), 1437–1457, 1981. <https://doi.org/10.1007/bf00553958>
- [13] E. Fitriatun, Introduction to powder metallurgy the process and its products, European Powder Metallurgy Association, 53 (9), 1689–1699, 2019.
- [14] J.R. Moon, Introduction to PM, A Residential training course for young materials engineers, course booklet, European Powder Metallurgy Association, London, 2007.
- [15] H. Hyer, L. Zhou, S. Park, G. Gottsfritz, G. Benson, B. Tolentino, B. McWilliams, K. Cho, Y. Sohn, Understanding the Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy, Metallography Microstructure and Analysis, 9 (4), 484–502, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13632-020-00659-w>
- [16] M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin, H. reza Baharvandi, The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy, Journal of Materials Process Technology, 209 (14), 5387–5393, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.007>
- [17] B. Chen, S.K. Moon, X. Yao, G. Bi, J. Shen, J. Umeda, K. Kondoh, Comparison Study on Additive Manufacturing (AM) and Powder Metallurgy (PM) AlSi10Mg Alloys, Powder Metallurgy of Non-ferrous Metals, 70 (5), 644–649, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2793-4>
- [18] T.K. Akopyan, N.A. Belov, A.G. Padalko, N. V. Letyagin, Effect of Hot Isostatic Pressing on the Structure and the Mechanical Properties of an Al–7Si–7Cu Composite Alloy, Russian Metallurgy, 2019 (9), 843–849, 2019. <https://doi.org/10.1134/S0036029519090027>
- [19] Q. Teng, X. Li, Q. Wei, Diffusion Bonding of Al 6061 and Cu by Hot Isostatic Pressing, Journal of Wuhan University Technology Materials Science Education, 35 (1), 183–191, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2242-4>
- [20] H.R. Ammar, A.M. Samuel, H.W. Doty, F.H. Samuel, The Influence of Hot Isostatic Pressing on the Fatigue Life of Al–Si–Cu–Mg 354-T6 Casting Alloy, International Journal of Metalcasting, 16 (3), 1315–1326, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00691-8>
- [21] X. Zhao, J. Meng, C. Zhang, W. Wei, F. Wu, G. Zhang, A novel method for improving the microstructure and the properties of Al-Si-Cu alloys prepared using rapid solidification/powder metallurgy, Materials Today Communicaion, 35, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105802>
- [22] K.R. Suresh, H.B. Niranjana, P.M. Jebaraj, M.P. Chowdiah, Tensile and wear properties of aluminum composites, Wear, 255 (1–6), 638–642, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00292-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00292-8)
- [23] S.H. Huo, M. Qian, G.B. Schaffer, E. Crossin, Aluminium powder metallurgy, Fundamentals Aluminium Metallurgy Production Processing and Applications, 2011, 655–701, 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.3.655>
- [24] P.D. Liddiard, Aluminium powder metallurgy in perspective, Powder Metallurgy, 27 (4), 193–200, 1984. <https://doi.org/10.1179/pom.1984.27.4.193>
- [25] P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. V. Kutumbarao, R.J.H. Wanhill, Aluminium Alloys for Aerospace Applications, Aerospace Materials and Material Technologies, 8 29–52, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_2
- [26] F. Stergioudi, A. Prospathopoulos, A. Farazas, E.C. Tsirogiannis, N. Michailidis, Mechanical Properties of AA2024 Aluminum/MWCNTs Nanocomposites Produced Using Different Powder Metallurgy Methods, Metals (Basel), 12 (8), 2022. <https://doi.org/10.3390/met12081315>
- [27] O. V. Rofman, A.S. Prosviryakov, A. V. Mikhaylovskaya, A.D. Kotov, A.I. Bazlov, V. V. Cheverikin, Processing and Microstructural Characterization of Metallic Powders Produced from Chips of AA2024 Alloy, Jom Aluminium Recycling and Environmental Footprint, 71 (9), 2986–2995, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03581-x>
- [28] M. Jafari, M.H. Enayati, M.H. Abbasi and F. Karimzadeh, Compressive and wear behaviours of bulk nanostructured Al2024 alloy, Materials and Design, 21 (2), 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.020>
- [29] M. Beder, S. B. Akçay, T. Varol and H. Çuvalcı, The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties and Oxidation Resistance of AlSi10Mg Alloy, Arabian Journal for Science and Engineering, 49, 15335–15346, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08971-1>
- [30] M. Beder, Effect of hot pressing method on the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy, Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 12 (4), 1420-1427, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1520826>





Kinoa protein-fenolik filmlerin karakterizasyonu: 4-hidroksibenzoik asit konsantrasyonunun etkisi

Characterization of quinoa protein-phenolic films: Impact of 4-hydroxy benzoic acid concentration

Mehmet Şükrü Karakuş^{1,*} 

¹ Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 63290, Şanlıurfa, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, kinoa protein izolatlarına farklı oranlarda (%1, %2, %3, %4 ve %5) 4-hidroksi benzoik asit (HB) ilave edilerek film oluşturulmuş ve elde edilen filmlerin yapısal, fizikokimyasal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Protein-fenolik etkileşimleri Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile ortaya konulmuştur. Filmlerin morfolojik yapısı taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile değerlendirilmiştir. Yüksek konsantrasyonlarda HB ilavesi (%5) filmlerin kalınlık (0.16 mm) ve nem içeriği (%24.67) değerlerini artırmıştır. Buna karşın HB konsantrasyonlarındaki artışa bağlı L değerleri kademeli olarak azalırken, a* ve b* değerleri ise kademeli olarak artış göstermiştir. Yine benzer şekilde opaklık değerleri 2.54'ten 6.22'ye yükselmiştir. En yüksek su buharı geçirgenliği değeri K-HB5 (0.91) filminde tespit edilmiştir. Ayrıca HB ilavesine bağlı olarak filmlerin mekaniksel özellikleri (gerilme direnci ve uzama katsayısı) iyileştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kinoa proteini, 4-Hidroksibenzoik asit, FTIR, SEM, Film

1 Giriş

Son yıllarda, sentetik ambalaj materyallerinin çevre üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı doğal ambalaj materyallerine bir yönelim söz konusudur [1]. Bu sentetik materyallerin gazlara karşı geçirgen olması ve hazırlanmalarında kullanılan düşük molekül ağırlıklı bazı bileşiklerin gıda maddelerine geçebileceği bildirilmiştir [2]. Bu nedenle son yıllarda sentetik materyaller yerine yenilebilir, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilir ambalaj malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır [3]. Yapılan araştırmalarda, proteinler, polisakkaritler ve lipitler yenilebilir/biyolojik olarak parçalanabilir doğal filmlerin potansiyel kaynakları haline gelmişlerdir. Genel olarak protein filmleri iyi bir gaz bariyeri özelliği sergilemekte ve iyi mekanik özelliklere sahip olabilmektedir [4]. Bu bağlamda farklı protein kaynakları (soya, bezelye, nohut, kinoa ve chia) doğal filmler oluşturmak için yaygın olarak kullanılmıştır [5].

Kinoa (*Chenopodium quinoa willd.*) yüksek oranda protein içeriğine (%12-23) ve zengin amino asit (lizin,

Abstract

In this study, films were formed by incorporating 4-hydroxy benzoic acid (HB) at concentrations of 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% into quinoa protein isolates. The effects of these varying concentrations on the structural, physicochemical, and mechanical properties of the resulting films were investigated. Protein-phenolic interactions were revealed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The morphological structure of the films was evaluated by scanning electron microscope (SEM). When HB addition was 5%, the film thickness (0.16 mm) and moisture content (24.67%) increased. In contrast, as the HB concentrations increased, L values gradually decreased, while a* and b* values gradually increased. Similarly, the opacity values increased from 2.54 to 6.22. The highest water vapor permeability value was determined in the K-HB5 (0.91) film. Furthermore, the addition of HB enhanced the mechanical properties of the films, specifically the tensile strength and elongation coefficient.

Keywords: Quinoa protein, 4-Hydroxybenzoic acid, FTIR, SEM, Film

metiyonin ve sistein) profiline sahip olmasından dolayı besinsel ve işlevsel özellikler gösteren yalancı bir tahıldır [6]. Kinoa proteini üzerine yapılan çalışmalarda, kinoa tohumlarındaki başlıca proteinlerin globulinler (%37), albüminler (%35) ve düşük oranda prolaminler (%0.5-7.0) olduğu rapor edilmiştir [7]. Ayrıca, kinoa düşük glisemik indeksli bir gıda olup yüksek miktarda çoklu doymamış yağ asitlerini ve lif içermektedir. Bundan dolayı, laktoz intoleransı ve diyabet gibi rahatsızlıkları olan insanların beslenmesinde faydalanılmaktadır [8].

Proteinlerin hem hidrofilik amino asit hem de hidrofobik kalıntıları içermeleri onların nem bariyeri olarak işlev görme kapasitelerini sınırlandırmaktadır. Bu yüzden, düşük su buharı geçirgenliğine sahip protein bazlı filmler oluşturmak için belirli katkı maddelerinin kullanılması önerilmektedir [2]. Daha iyi özelliklere sahip protein filmleri üretmek amacıyla fenolik bileşikler kullanılmıştır. Bunlar arasında rutin, epikateşin, ferulik asit ve 4-hidroksi benzoik asit bulunmaktadır [9, 10, 11]. Bu fenolik bileşiklerin filmlerin fizikokimyasal, bariyer ve mekanik özelliklerini iyileştirebileceği öne sürülmüştür [12].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sukrukarakus@harran.edu.tr (M. Ş. Karakuş)
Geliş / Received: 27.11.2024 Kabul / Accepted: 15.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1592182

Bu çalışmada kullanılan 4-hidroksibenzoik asit (HB) çeşitli farmakolojik özelliklere ve çok çeşitli endüstriyel uygulamalara sahip değerli bir kimyasal olan fenolkarboksilik asit olarak bilinmektedir. HB'nin antioksidan, antibakteriyel, oraklanma önleyici, kardiyoprotektif, antidiyabetik, antikanser gibi çok sayıda tıbbi özelliği bulunmaktadır. Ayrıca, HB, ilaç, kozmetik ve gıda gibi çeşitli endüstrilerde yaygın uygulama alanlarına sahiptir [13].

Tüm bu veriler ışığında bu çalışmanın amacı farklı oranlarda HB içeren kinoa protein bazlı filmlerin özelliklerini ortaya koymaktır. Bu bağlamda, protein filmlerine farklı konsantrasyonlarda HB ilave edilerek oluşturulan filmlerin yapısal, morfolojik, fizikokimyasal, bariyer ve mekanik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada protein üretiminde kullanılan kinoa tohumları yerel bir firmadan (Şanlıurfa, Türkiye) satın alınmıştır. HB ise Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer tüm kimyasallar aksi belirtilmedikçe analitik saflıkta olup Sigma ve Merck firmalarından tedarik edilmiştir.

2.2 Kinoa proteinlerinin üretimi

Kinoa proteinlerinin üretimi daha önce yapılmış bir çalışmada bazı modifikasyonlar yapılarak gerçekleştirilmiştir [5]. Homojen parçacık boyutuna (0.3-0.75 mm) sahip kinoa tozu 1:10 (w/v) oranında distile su ile karıştırılmıştır. Protein solüsyonunun pH değeri 9.5'a (0.1N NaOH) ayarlanarak manyetik karıştırıcıda 2 s karıştırılmıştır (40 °C). Daha sonra bu solüsyon 4000 rpm'de 10 dk. santrifüj (Nüve, NF 1200R, Türkiye) edilmiş ve süpernatantlar toplanmıştır. Süpernatantların pH değeri 4.5'e (0.1N HCl) ayarlandıktan sonra proteinler çöktürülmüştür. Çöken proteinler tekrar santrifüj işlemine (4000 rpm'de 10 dk.) tabi tutulmuş ve üst faz uzaklaştırılmıştır. Elde edilen protein peletleri liyofilize edilerek (CoolerMed, Türkiye) toz forma (Özütleme verimi: %75.5; protein saflığı: 71.3 g/100g; nem içeriği: %5.7) dönüştürülmüştür. Elde edilen kinoa proteinleri film üretiminde kullanılmıştır.

2.3 Protein-fenolik filmlerin oluşturulması

Protein-fenolik film komplekslerinin oluşturulması önceki bir çalışmada bazı modifikasyonlar yapılarak gerçekleştirilmiştir [14]. Film üretimi için, 3.5 g kinoa proteini (%7 w/w), ağırlıkça %30 gliserol (protein ağırlığı) 45 mL distile su içerisinde çözündürülmüştür. Çözelti sürekli karıştırılarak 60 °C'de 30 dk. ısıtılma tabi tutulmuştur. Diğer yandan, HB (%1, %2, %3, %4 ve %5 protein ağırlığı) 5 mL distile suda tamamen çözünene kadar karıştırılmıştır. Aynı ayrı hazırlanan iki çözeltinin pH değeri 7.0 (0.1N NaOH) ayarlandıktan sonra karıştırılmış ve 60 °C'de 30 dk. daha ısıtılmıştır. Film çözeltileri (10 mL) plastik petrilere aktarılmış ve 25 °C'de 24 s kurumaya bırakılmıştır. Filmler sırasıyla %0 (yalnızca kinoa proteini), %1, %2, %3, %4 ve %5-HB konsantrasyonu için K-HB0, K-HB1, K-HB2, K-HB3, K-HB4 ve K-HB5 olarak isimlendirilmiştir.

2.4 Film analizleri

2.4.1 FTIR

Kinoa proteini ve film örneklerindeki karakteristik grupları belirlemek için Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi (IRTracer-100, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japonya) kullanılmıştır. Analiz 1 cm⁻¹ çözünürlükte ve 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir [15].

2.4.2 SEM

Protein-fenolik filmlerin yüzey morfolojik yapısı SEM (ZEISS Sigma 300 Alan Emisyon SEM, Oberkochen, Almanya) ile belirlenmiştir. Analizden önce filmler vakum altında paladyum ile kaplanmıştır [16]. Ayrıca filmlerin gerçek görüntüleri bir kamera yardımıyla elde edilmiştir.

2.4.3 Fizikokimyasal analizler

Film örneklerinin kalınlık değeri dijital bir mikrometre (D&W measuring) kullanılarak farklı yerlerden alınan kalınlık değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır [17].

Nem içeriği, örneklerin 105 °C'de etüv fırınında (Nüve FN400, Türkiye) 24 s kurutulmasıyla gravimetrik olarak hesaplanmıştır [18].

Filmlerin L , a^* ve b^* renk değerleri bir kolorimetre cihazı (Color Quest® XE, ABD) kullanılarak ölçülmüştür [19].

Film örneklerinin opaklık değeri filmin 600 nm'deki absorpsiyonunun film kalınlığına (mm) bölünmesiyle hesaplanmıştır. Bu amaçla filmler belirli oranlarda (2x2 cm²) kesilmiş ve spektrofotometre küvetinin çeperine tutturularak 600 nm'deki absorpsiyon değeri okunmuştur. Boş küvet ise kontrol olarak kullanılmıştır [20].

Örneklerin su buharı geçirgenliği (WVP), Alexandre ve ark. [21]'nin uyguladığı gravimetrik yöntemle tespit edilmiştir.

2.4.4 Filmlerin mekanik özellikleri

Protein-fenolik kompleks filmlerinin mekanik davranışı, ASTM D882-0217 prosedürüne göre bir TA-XT Tekstür Analiz cihazı (TA-XT32, Stable Micro System, Godalming, İngiltere) kullanılarak belirlenmiştir. Çekme çene problemleri arasına film örnekleri yerleştirilerek numuneler kopana kadar gerilmiştir. Cihaz yazılımı aracılığıyla gerilme direnci (GD (MPa)) ve uzama katsayısı (UK (%)) değerleri belirlenmiştir.

2.5 İstatistiksel analizler

Tüm üretimler ve analizler üç kez gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ortalama±standart sapma olarak verilmiştir. Grafikler OriginPro 2021b (Origin Lab Inc.) kullanılarak oluşturulmuştur. Ortalamalar arasındaki farklar, Tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve Tukey çoklu karşılaştırma testi kullanılarak %95 (p<0.05) güven düzeyinde tanımlanmıştır. İstatistiksel farklılıklar SPSS 22 paket programı (Windows için sürüm 22.0, SPSS Inc., Chicago, IL, ABD) ile gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

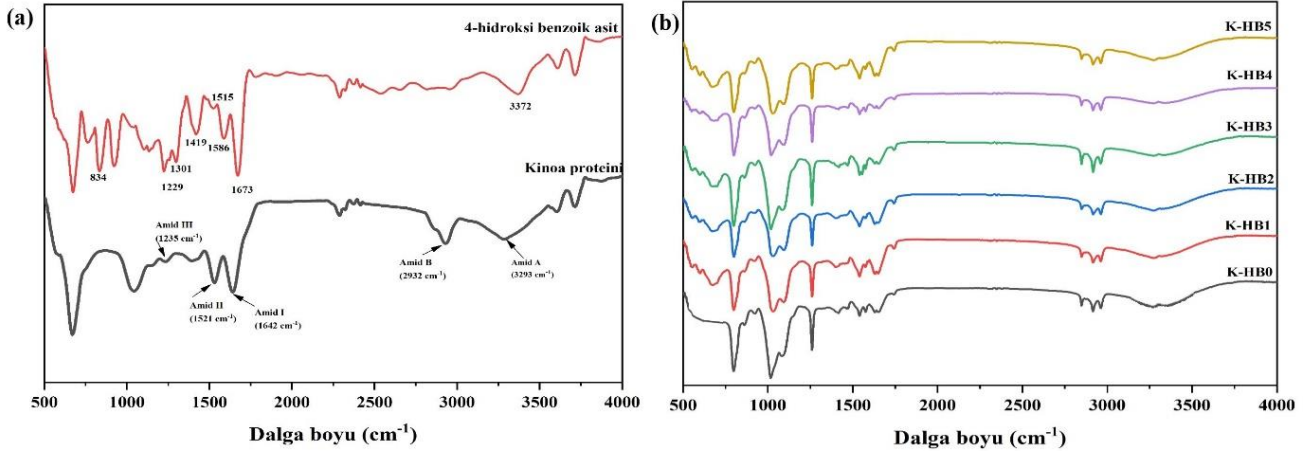
3.1 FTIR

FTIR spektroskopisi, polimerlerdeki molekül içi/moleküller arası bağları tanımlamak için kullanılan bir yöntemdir [16]. Bu analiz, moleküler karakterizasyon ve polimerler arasındaki etkileşimleri ortaya koymak için yapılmıştır. Kinoa proteini, HB asit ve protein-fenolik filmlerin karakteristik bantları Şekil 1a ve 1b'de sunulmuştur. Proteinlerin absorpsiyon bantları esas olarak amid I, amid II ve amid III'ten oluşmaktadır ve sırasıyla 1600-1700 cm^{-1} , 1500-1600 cm^{-1} ve 1200-1300 cm^{-1} dalga boylarına karşılık gelmektedir (Şekil 1a). Amid I bandı C=O gerilmesinden, amid II N-H bükülmeleri ve C-N gerilmelerine, amid III bandı ise C-N gerilmelerine, N-H bükülmelerine ve C-C gerilmelerinden ortaya çıkmaktadır. Ayrıca amid A (3200-3300 cm^{-1}) N-H ve amid B (2900-3000 cm^{-1}) ise =CH ve -NH₃ titreşimlerinden kaynaklanmaktadır [22]. HB için ise 3372 cm^{-1} (OH) hidroksil grubu, 1673 cm^{-1} (C=O) karbonil grubu, 1586 cm^{-1} aromatik halka C=C çift bağını, 1419 cm^{-1} karboksilik asit, 1301 cm^{-1} karboksilik asit ve fenolik grubunu, 1229 cm^{-1} C-O bağını, 834 cm^{-1} aromatik halkadaki C-H bağlarını temsil etmektedir (Şekil 1a) [23]. Ayrıca 1000-1100 cm^{-1} arasındaki spektrum gliserolün (plastikleştirici) varlığından kaynaklanmaktadır.

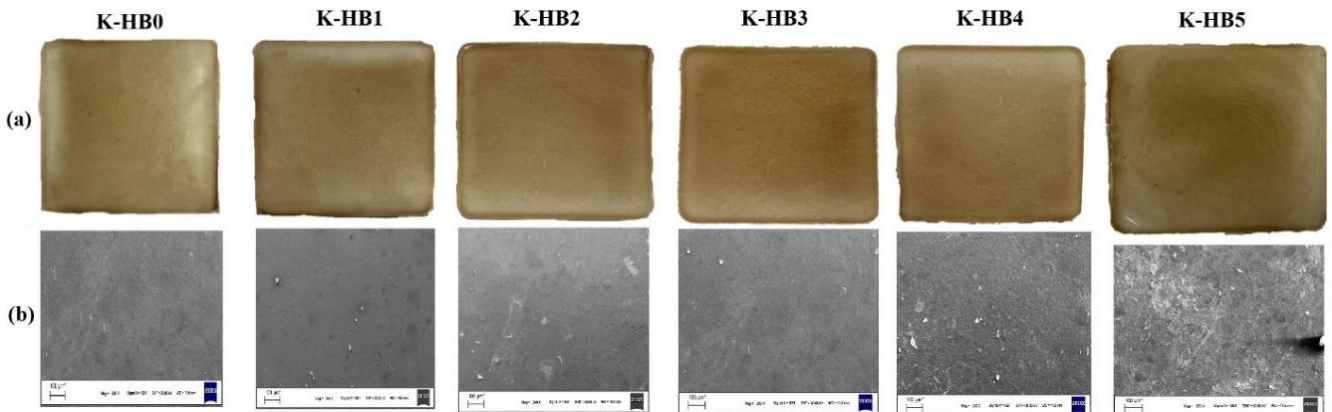
Filmlerin FTIR spektrumuna ait pikler incelendiğinde 3280-3350 cm^{-1} aralığında OH gerilmesine karşılık gelen bir tepe belirlenmiştir (Şekil 1b). HB katkılı filmlerin 3300 cm^{-1} bölgesindeki yoğunluğunun yalnız kinoa ile üretilen filmde daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kinoa filmine (K-HBO) kıyasla amid-I bölgesinde (1636 cm^{-1}) 4-hidroksi benzoik asit ilaveli filmlerin yoğunluğunda bir artış meydana gelmiş ve bu durum C=O bağlarının artan varlığına atfedilmiştir [24]. Her iki durumda da filmlerde meydana gelen değişimler hidrojen bağlarının oluşumuna bağlanmıştır [25]. Daha önceki çalışmalarda da benzer FTIR sonuçları bildirilmiştir [24, 26]. FTIR spektrum sonuçları HB'nin kinoa proteinine başarılı bir şekilde dahil edildiğini göstermiştir.

3.2 Filmlerin gerçek ve SEM görüntüleri

Protein-fenolik film formülasyonlarına ait gerçek ve SEM görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Filmler görsel olarak değerlendirilmiş ve kurutmadan sonra herhangi bir kırılma veya kopma tespit edilmemiştir. Tüm filmlerin gerçek görüntüleri incelendiğinde yüzeyde pürüzsüz bir görüntü %3 HB katkısına kadar devam etmiştir. Buna karşın yüksek oranda HB katkısı (%4-5) yüzeyde kümelenmiş ve birikmiş olarak görülmüştür.



Şekil 1. FTIR spektrumları; a) Kinoa proteini ve HB spektrumu; b) Protein-fenolik filmlerine ait spektrumlar



Şekil 2. Protein-fenolik filmlerine ait gerçek (a) ve SEM görüntüleri (b)

Protein-fenolik film sistemlerinin mikro yapısı üzerinde hidroksi benzoik asidin etkisini incelemek için filmlerin yüzey morfolojisi SEM analizi ile değerlendirilmiştir. K-HB0, K-HB1, K-HB2, K-HB3 filmlerinde katmanlaşma görülmezken, K-HB4 ve K-HB5 filmlerinde ise katmanlaşma eğilimi olduğu tespit edilmiştir. Başka bir ifadeyle, belirli bir konsantrasyona kadar (%3'e kadar) filmlerin yüzeyi düzgün bir yapı sergilerken artan HB konsantrasyonuyla giderek daha pürüzlü bir yapı oluştuğu görülmüştür. Benzer sonuçlar bezelye proteini-kumarik asit filmlerinde de gözlemlenmiştir. Artan kumarik asit oranlarına bağlı morfolojik yapıda büyük dalgalanmalar olduğu bildirilmiştir [26]. Bu gözlem, proteinler ve polifenoller arasındaki benzersiz etkileşime atfedilebilmektedir. Başka bir deyişle, artan çapraz bağlama derecesi, çapraz bağlı kompleksin polifenollerin filmlerin yüzeyine yapışmasına izin vereceği şeklinde rapor edilmiştir [27].

3.3 Filmlerin fizikokimyasal özellikleri

Kalınlık, film oluşturan sıvının hacmi veya yayılma alanının boyutu ile ilgili olan filmlerin fiziksel özelliklerinin önemli bir göstergesidir [28]. Filmlerin kalınlık değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Film örneklerine ilave edilen HB oranı %3'e kadar film kalınlık değerleri üzerinde önemsiz bir etkiye sahipken ($p>0.05$), oran artmasıyla kalınlık değerlerinde gözle görülür bir artış meydana gelmiştir. Başka bir ifadeyle en yüksek kalınlık değeri K-HB5 örneğinde tespit edilmiştir ($p<0.05$). Bu durumun artan HB konsantrasyonlara bağlı birikme/kümelenme ve moleküler birleşmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer durum önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir. Fenolik konsantrasyonundaki artış ile fenolik ve protein moleküllerinin birleşmesine bağlı düzenli yapıların oluşumu engellenmiş ve film kalınlığında artış meydana geldiği belirtilmiştir [29, 30]. Çalışmada elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla benzerlik sergilemektedir.

Örneklerin nem içeriği değerleri incelendiğinde en yüksek değer K-HB5 filminde (%24.67) tespit edilmiştir. Bunu sırasıyla K-HB4 (%22.67), K-HB0 (%22.15), K-HB1 (%20.97), K-HB2 (%18.22) ve K-HB3 (%15.71) takip etmiştir (Tablo 1). Yine benzer şekilde belirli bir orana kadar HB ilavesi nem içeriğini azaltmasına rağmen artan HB konsantrasyonlarında nem içeriği artış göstermiştir. Benzer

bulgular soya proteini-kateşin filmlerinde de tespit edilmiştir. Kateşin miktarının artmasına bağlı nem içeriğinde artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum fenolik konsantrasyonundaki artışa bağlı polifenollerin ve protein filminin çapraz bağlanmasıyla oluşan ağ yapısının tahrip olmasına atfedilmiştir [30]. Başka bir neden ise kalınlık değerindeki artış olabilir. Kalınlık değerindeki artışa bağlı olarak daha çok su tutulacağından dolayı nem içeriğinin arttığı düşünülmektedir. Ayrıca yapılan korelasyon analizi sonucunda kalınlık ile nem içeriği arasında pozitif yönde önemli bir ilişki tespit edilmiştir ($r=0.774$, $p=0.003$). Başka bir ifadeyle, kalınlık değeri arttıkça nem içeriği de artış göstermiştir.

Protein-fenolik filmlere ait L , a^* ve b^* renk değerleri Tablo 1'de verilmiştir. HB içeren tüm film örnekleri yalnız kinoa proteini içeren K-HB0 filminden daha düşük L değerine sahipti. Bu durum, HB konsantrasyonuna bağlı filmlerin daha koyu görünmesine neden olduğunu göstermiştir. Başka bir ifadeyle fenolik ilavesi filmlerin parlaklık değerini kademeli olarak azaltmıştır. Benzer sonuçlar önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir [1, 30]. Buna karşın a^* ve b^* değerleri HB ilavesiyle kademeli bir şekilde artış göstermiştir. Bu fenomen, proteinlerin polifenollerle etkileşimi sonucunda oksijen moleküllerinin polifenolün hidroksil grubunu okside etmesine bağlı bir kinon oluşumuna ve bunun sonucunda renkte değişimler olmasına atfedilmiştir [31].

Opaklık değeri, filmin homojenlik derecesiyle ilgilidir ve bu nedenle filmin formülasyonuna ve üretim prosedürlerine bağlı bir parametredir [32]. Film örneklerine ait opaklık değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. HB içeren filmlerin yalnız kinoa proteini içeren filme kıyasla daha yüksek opaklık değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. En yüksek opaklık değeri %5 HB içeren K-HB5 filminde belirlenmiştir. Bu durum kümeleşme ve çözünmemiş parçacıklara bağlı daha büyük parçacıkların oluşumuna ve sonuçta ışık iletimini engellemesine bağlanmıştır [33]. Bir diğer neden ise daha sızdırmaz bir matris oluşturan protein-fenolik etkileşimlerdeki artışa atfedilmiştir [9]. Benzer eğilimler önceki çalışmalarda da ifade edilmiştir [26, 30]. Artan opaklık değerinin, gıda muhafazası için ışığa duyarlı gıda ürünlerinin ambalajlanmasında potansiyel faydalarını ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Protein-fenolik filmlerine ait fizikokimyasal özellikler

Örnek	Kalınlık (mm)	Nem içeriği (%)	L	a^*	b^*	Opaklık (A_{600}/mm)
K-HB0	0.11±0.01 ^c	22.15±0.21 ^c	77.78±0.03 ^a	-1.78±0.04 ^e	27.98±0.11 ^d	2.54±0.03 ^f
K-HB1	0.11±0.01 ^c	20.97±0.10 ^d	76.26±0.11 ^b	-1.32±0.04 ^d	30.10±0.21 ^c	2.76±0.02 ^e
K-HB2	0.11±0.01 ^c	18.22±0.10 ^e	73.74±0.04 ^c	-0.81±0.03 ^c	32.91±0.13 ^b	3.04±0.04 ^d
K-HB3	0.10±0.01 ^c	15.71±0.08 ^f	73.10±0.06 ^d	-0.56±0.02 ^b	33.01±0.13 ^b	3.26±0.04 ^c
K-HB4	0.13±0.01 ^b	22.67±0.08 ^b	72.37±0.08 ^e	-0.23±0.01 ^a	37.15±0.18 ^a	5.47±0.06 ^b
K-HB5	0.16±0.01 ^a	24.67±0.18 ^a	72.41±0.07 ^e	-0.21±0.01 ^a	37.16±0.06 ^a	6.22±0.13 ^a

Aynı sütundaki farklı küçük harfler (a-f) örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı belirtmektedir ($p<0.05$). K-HB0: HB içermeyen kinoa proteinli film; K-HB1: %1 oranında HB içeren film; K-HB2: %2 oranında HB içeren film; K-HB3: %3 oranında HB içeren film; K-HB4: %4 oranında HB içeren film; K-HB5: %5 oranında HB içeren film

Su buharı geçirgenliği (SBG), filmin bariyer özellikleriyle ilgili bir parametredir. HB ilavesinin filmlerin SBG değeri üzerine etkisi önemli bulunmuştur ($p<0.05$). Başka bir ifadeyle, en yüksek su buharı geçirgenliği K-HB5, en düşük ise K-HB3 filminde tespit edilmiştir (Tablo 2). Literatürde bu değer ile ilgili çelişkili sonuçlar bildirilmiştir. Başka bir deyişle, soya proteine artan konsantrasyonlarda kateşin ilavesinin SBG değerini arttırdığı bildirilmiştir. Bu durumun kateşin ve soya filmlerinin arayüz etkileşimi, proteinler ve su arasındaki etkileşimde bir azalmaya neden olarak su moleküllerinin filmde serbestçe geçmesinden kaynaklanmaktadır [30]. Buna karşın yapılan başka bir çalışmada ise soya proteinine rutin ilavesiyle SBG değerinin azaldığı rapor edilmiştir. Bu fenomen soya proteini polimerinin zincirler arası boşluğunun azalmasına neden olarak film matrisindeki su moleküllerinin hareketliliğinin azalmasına ve dolayısıyla film boyunca su göçünün sınırlandırılacağına bağlanmıştır [9].

Tablo 2. Film örneklerin su buharı geçirgenliği ve mekanik özellikleri

Örnek	Su buharı geçirgenliği (SBG)	Gerilme direnci (GD) (MPa)	Uzama katsayısı (UK) (%)
K-HBO	0.53±0.00 ^c	5.25±0.03 ^c	114.84±0.40 ^c
K-HB1	0.54±0.00 ^c	4.19±0.04 ^d	114.38±0.39 ^c
K-HB2	0.52±0.00 ^d	5.39±0.04 ^b	115.68±0.60 ^c
K-HB3	0.51±0.01 ^e	6.79±0.05 ^a	142.85±0.38 ^a
K-HB4	0.70±0.00 ^b	5.28±0.05 ^c	127.72±0.86 ^b
K-HB5	0.91±0.00 ^a	3.58±0.03 ^e	110.79±0.47 ^d

Aynı sütundaki farklı küçük harfler (a-f) örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı belirtmektedir ($p<0.05$). K-HBO: HB içermeyen kinoa proteinli film; K-HB1: %1 oranında HB içeren film; K-HB2: %2 oranında HB içeren film; K-HB3: %3 oranında HB içeren film; K-HB4: %4 oranında HB içeren film; K-HB5: %5 oranında HB içeren film

3.4 Mekanik özellikler

Gerilme direnci (GD), bir filmin kopmadan önce şeklini koruyabileceği maksimum gerilimi temsil ederken, uzama katsayısı (UK) ise filmin kopmadan önceki deformasyonunu belirtmektedir [26]. Protein-fenolik filmlerine ait mekaniksel özellikler Tablo 2’de sunulmuştur. Gerilme direnci ve uzama katsayısı değerleri incelendiğinde en yüksek değer K-HB3, en düşük değer ise K-HB5 örneğinde belirlenmiştir. Protein bazlı filmlerin oluşumu, protein molekülleri arasındaki kovalent ve kovalent olmayan kuvvetlerin bir sonucudur. Bu nedenle, bu kuvvetleri artıran herhangi bir işlem filmin mekaniksel özelliklerini iyileştirebilir. Başka bir ifadeyle, protein molekülleri arasındaki yüksek etkileşimler film oluşumuna katkıda bulunmasına rağmen, kümelenmeden kaynaklanan büyük parçacıkların film mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiş olabileceği rapor edilmiştir [26]. Literatürde bu sonuçlarla ilgili çelişkili bulgular sunulmuştur. Yapılan bir çalışmada kitosan ve kitosan-gallik asit film kompleksleri oluşturulmuş ve mekaniksel özellikleri kıyaslanmıştır. Kitosan-gallik asit filmi yüksek gerilme direnci göstermesine rağmen uzama katsayısı değeri daha düşük bulunmuştur [24]. Yapılan başka bir çalışmada ise gerilme direnci değeri artan kateşin konsantrasyonları ile önce artmış, ardında azalmıştır. Bu durum kateşin ve film oluşturan matris arasında güçlü bir kovalent çapraz

bağlanma meydana getirmiştir. Kateşin konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak filmlerde heterojen bir yapı oluşabilir ve bu da moleküler etkileşimleri etkileyerek gerilme direnci değerini azaltabilmektedir [30]. Başka bir fenomen ise fenoliklerin proteine bağlanma eşdeğerinin artması sonucunda çözeltideki serbest fenolik proteinle reaksiyona girememekte ve bunun sonucunda filmde bir boşluk oluşmakta ve gerilme direnci değeri düşmektedir [34].

4 Sonuçlar

Doğal ve yenilebilir bitkisel protein bazlı film sistemleri tasarlamak mümkündür. Buna karşın bu filmlerin karakteristik özelliklerinden gıda koruma davranışına kadar birçok sorun bulunmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmenin bir yolu proteinler ve fenolikler arasında kompleksler oluşturmaktır. Bu çalışma, protein-fenolik film komplekslerinin gelişmiş özellikler oluşturabileceğini göstermiştir. Protein-fenolik arasındaki bağlanmalar FTIR analizi ile ortaya konulmuştur. Protein bazlı filmlere belirli bir orana kadar HB ilavesi film özellikleri üzerinde olumlu etkiler göstermiştir. Başka bir ifadeyle belirli bir orana kadar HB ilavesi (%3’e kadar) daha iyi su buharı geçirgenliği ve mekaniksel özellikler sergilemiştir. Artan HB konsantrasyonun film özellikleri üzerinde olumsuz etkiler ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları sürdürülebilir gıda paketleme uygulamaları için fenolik protein bazlı filmler geliştirmek için potansiyel bir yaklaşım olduğunu ortaya koymuştur. Bu film komplekslerinin gıdaların paketlenmesi ve korunmasına yönelik etkilerini değerlendirmek için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıca yapılacak çalışmalarda bu filmlerin antioksidan/antimikrobiyal aktiviteleri ve model gıdalarda kaplama materyali olarak kullanım özellikleri de araştırılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] S. Kocakulak, G. Sumnu, and S. Sahin, Chickpea flour-based biofilms containing gallic acid to be used as active edible films. *Journal of Applied Polymer Science*, 136 (26), 47704, 2019. <https://doi:10.1002/app.47704>.
- [2] W. Zhang, Y. Zhang, J. Cao, and W. Jiang, Improving the performance of edible food packaging films by using nanocellulose as an additive. *International Journal of Biological Macromolecules*, 166, 288–296, 2021. <https://doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.10.185>.
- [3] J. Gómez-Estaca, P. Montero, F. Fernández-Martín, A. Alemán, and M. C. Gómez-Guillén, Physical and chemical properties of tuna-skin and bovine-hide gelatin films with added aqueous oregano and rosemary extracts. *Food Hydrocolloids*, 23 (5), 1334–1341, 2009. <https://doi:10.1016/j.foodhyd.2008.09.013>.
- [4] A. Arabestani, M. Kadivar, M. Shahedi, S. A. H. Goli, and R. Porta, Properties of a new protein film from

- bitter vetch (*Vicia ervilia*) and effect of CaCl₂ on its hydrophobicity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 57, 118–123, 2013. <https://doi:10.1016/j.ijbiomac.2013.02.020>.
- [5] N. A. Mir, C. S. Riar, and S. Singh, Effect of film forming solution pH on antibacterial, antioxidant and structural characteristics of edible films from modified quinoa protein. *Food Hydrocolloids*, 135, 108190, 2023. <https://doi:10.1016/j.foodhyd.2022.108190>.
- [6] S. Dakhili, L. Abdolalazadeh, S. M. Hosseini, S. Shojaee-Aliabadi, and L. Mirmoghtadaie, Quinoa protein: Composition, structure and functional properties. *Food Chemistry*, 299, 125161, 2019. <https://doi:10.1016/j.foodchem.2019.125161>.
- [7] L. E. Abugoch, N. Romero, C. A. Tapia, J. Silva, and M. Rivera, Study of Some Physicochemical and Functional Properties of Quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd*) Protein Isolates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (12), 4745–4750, 2008. <https://doi:10.1021/jf703689u>.
- [8] R. Vilcacundo and B. Hernández-Ledesma, Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). *Current Opinion in Food Science*, 14, 1–6, 2017. <https://doi:10.1016/j.cofs.2016.11.007>.
- [9] K. Friesen, C. Chang, and M. Nickerson, Incorporation of phenolic compounds, rutin and epicatechin, into soy protein isolate films: Mechanical, barrier and cross-linking properties. *Food Chemistry*, 172, 18–23, 2015. <https://doi:10.1016/j.foodchem.2014.08.128>.
- [10] M. M. Alves, M. P. Gonçalves, and C. M. R. Rocha, Effect of ferulic acid on the performance of soy protein isolate-based edible coatings applied to fresh-cut apples. *LWT-Food Science and Technology*, 80, 409–415, 2017. <https://doi:10.1016/j.lwt.2017.03.013>.
- [11] J. Liu, S. Liu, Y. Chen, L. Zhang, J. Kan, and C. Jin, Physical, mechanical and antioxidant properties of chitosan films grafted with different hydroxybenzoic acids. *Food Hydrocolloids*, 71, 176–186, 2017. <https://doi:10.1016/j.foodhyd.2017.05.019>.
- [12] D. Günal-Köroğlu and E. Capanoglu, Plant protein-based edible films and the effect of phenolic additives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–21, 2024. <https://doi:10.1080/10408398.2024.2328181>.
- [13] A. N. Joshi, A. K. Chandrakar, and K. L. Wasewar, Efficacy of natural oils and conventional chemicals in the physical extraction of 4-hydroxybenzoic acid from aqueous solution. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99 (8), 100636, 2022. <https://doi:10.1016/j.jics.2022.100636>.
- [14] P. Rani, P. K. Yadav, A. K. Singh, S. Nayak, K. D. Kumar, and R. Kumar, Structural, material and antibacterial properties of quercetin incorporated soy protein isolate films and its binding behavior through molecular docking. *Biopolymers*, 115 (2), 2024. <https://doi:10.1002/bip.23569>.
- [15] Y. Zhao, Z. Ren, L. Shi, and W. Weng, Effect of W/O pre-emulsion prepared with different emulsifiers on the physicochemical properties of soy protein isolate-based emulsion films. *Food Hydrocolloids*, 139, 108440, 2023. <https://doi:10.1016/j.foodhyd.2022.108440>.
- [16] H. Chen, C. Wu, X. Feng, M. He, X. Zhu, Y. Li, and F. Teng, Effects of two fatty acids on soy protein isolate/sodium alginate edible films: Structures and properties. *LWT- Food Science and Technology*, 159, 113221, 2022. <https://doi:10.1016/j.lwt.2022.113221>.
- [17] Q. Li, Q. Ma, Y. Wu, Y. Li, B. Li, X. Luo, and S. Liu, Oleogel Films Through the Pickering Effect of Bacterial Cellulose Nanofibrils Featuring Interfacial Network Stabilization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (34), 9150–9157, 2020. <https://doi:10.1021/acs.jafc.0c03214>.
- [18] A. Kurt and T. Kahyaoglu, Characterization of a new biodegradable edible film made from salep glucomannan. *Carbohydrate Polymers*, 104, 50–58, 2014. <https://doi:10.1016/j.carbpol.2014.01.003>.
- [19] Y. Liu, Y. Zhang, M. Zhen, Y. Wu, M. Ma, Y. Cheng, and Y. Jin, Effect of catechin and tannins on the structural and functional properties of sodium alginate/gelatin/ poly (vinylalcohol) blend films. *Food Hydrocolloids*, 135, 108141, 2023. <https://doi:10.1016/j.foodhyd.2022.108141>.
- [20] J. Cheng, J. Wang, Z. Li, B. Chen, and L. Cui, Improving the mechanical and water-resistance properties of pea protein-based edible film via wet-heating Maillard reaction: Insights into the simultaneous effect of heating and Maillard reaction. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 101024, 2023. <https://doi:10.1016/j.fpsl.2023.101024>.
- [21] E. M. C. Alexandre, R. V. Lourenço, A. M. Q. B. Bittante, I. C. F. Moraes, and P. J. do A. Sobral, Gelatin-based films reinforced with montmorillonite and activated with nanoemulsion of ginger essential oil for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 10, 87–96, 2016. <https://doi:10.1016/j.fpsl.2016.10.004>.
- [22] J. Kong and S. Yu, Fourier Transform Infrared Spectroscopic Analysis of Protein Secondary Structures. *Acta biochimica et biophysica Sinica*, 39 (8), 549–559, 2007. <https://doi:10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x>.
- [23] S. Alfei, D. Caviglia, S. Penco, G. Zuccari, and F. Gosetti, 4-Hydroxybenzoic Acid as an Antiviral Product from Alkaline Autoxidation of Catechinic Acid: A Fact to Be Reviewed. *Plants*, 11 (14), 1822, 2022. <https://doi:10.3390/plants11141822>.
- [24] C. R. Lee, S. J. Lee, T. I. Kim, K. Chathuranga, J. S. Lee, S. Kim...and W. H. Park, Chitosan-gallic acid conjugate edible coating film for perishable fruits. *Food Chemistry*, 463, 141322, 2025. <https://doi:10.1016/j.foodchem.2024.141322>.
- [25] T. Nisar, Z.-C. Wang, X. Yang, Y. Tian, M. Iqbal, and Y. Guo, Characterization of citrus pectin films integrated with clove bud essential oil: Physical, thermal, barrier, antioxidant and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106, 670–680, 2018. <https://doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.08.068>.

- [26] X. Gong, H. Choi, J. Cheng, J. S. R. V. Winfred, and L. Cui, "Pea protein-p-coumaric acid conjugate-based antioxidant film: The relationship between protein structure and film properties after covalent bonding. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 137271, 2024. [https://doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137271](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137271).
- [27] Y. Li, C. Zhong, H. Zhang, Y. Zhao, M. Shu, and G. Wu, Effectiveness of bacteriophage JN01 incorporated in gelatin film with protocatechuic acid on biocontrol of *Escherichia coli* O157:H7 in beef. *International Journal of Food Science & Technology*, 57 (6), 3503–3514, 2022. [https://doi: 10.1111/ijfs.15673](https://doi.org/10.1111/ijfs.15673).
- [28] L. Wang, M. A. E. Auty, and J. P. Kerry, Physical assessment of composite biodegradable films manufactured using whey protein isolate, gelatin and sodium alginate. *Journal of Food Engineering*, 96 (2), 199–207, 2010. [https://doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.07.025](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.025).
- [29] H. Kang, Z. Wang, W. Zhang, J. Li, and S. Zhang, Physico-chemical properties improvement of soy protein isolate films through caffeic acid incorporation and tri-functional aziridine hybridization. *Food Hydrocolloids*, 61, 923–932, 2016. [https://doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.009).
- [30] X. Wang, W. Wang, S. Luo, N. Wang, L. Wang, N. Zhang, and D. Yu, Evaluation of ohmic heating modified soybean protein isolate structure and antioxidant film under different catechin concentrations. *LWT-Food Science and Technology*, 186, 115224, 2023. [https://doi: 10.1016/j.lwt.2023.115224](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115224).
- [31] T. Prodpran, S. Benjakul, and S. Phatcharat, Effect of phenolic compounds on protein cross-linking and properties of film from fish myofibrillar protein. *International Journal of Biological Macromolecules*, 51 (5), 774–782, 2012. [https://doi: 10.1016/j.ijbiomac.2012.07.010](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.07.010).
- [32] N. Gontard, S. Guilbert, and J. Cuq, Edible Wheat Gluten Films: Influence of the Main Process Variables on Film Properties using Response Surface Methodology. *Journal of Food Science*, 57 (1), 190–195, 1992. [https://doi: 10.1111/j.1365-2621.1992.tb05453.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb05453.x).
- [33] J. Cheng and L. Cui, Effects of high-intensity ultrasound on the structural, optical, mechanical and physicochemical properties of pea protein isolate-based edible film. *Ultrasonics Sonochemistry*, 80, 105809, 2021. [https://doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105809](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105809).
- [34] C. Martins, F. Vilarinho, A. S. Silva, M. Andrade, A. V. Machado, M. C. Castilho..... and F. Ramos, Active polylactic acid film incorporated with green tea extract: Development, characterization and effectiveness. *Industrial crops and products*, 123, 100–110, 2018. [https://doi: 10.1016/j.indcrop.2018.06.056](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.056).





Harnessing deep learning for multi-class weed species identification in agriculture

Tarımda çok sınıflı yabancı ot türlerinin tanımlanması için derin öğrenmenin kullanımı

Ebru Ergün^{1,*} 

¹ Recep Tayyip Erdoğan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Rize, Türkiye

Abstract

Effective identification of weed species is critical for efficient agricultural management, enabling targeted eradication and optimized farming practices. In this study, ResNet, VggNet and DenseNet were used to evaluate the performance of deep learning models in accurately classifying different weed species. The dataset consisted of high-resolution images of different weed species taken under different environmental conditions. The experimental results demonstrated the ability of these models to identify multiple weed species with high accuracy. Evaluation metrics, accuracy, precision, recall and confusion matrices, validated the effectiveness of the models in discriminating between species. Of the convolutional neural network architectures tested, VggNet showed the highest classification accuracy of 99.21%. The results underscored the potential of deep learning-based classification systems in advancing scalable and efficient weed species identification and management for agricultural applications.

Keywords: Agricultural management, Classification, Deep learning, Multi-class, Precision agriculture, Weed species identification

1 Introduction

Agriculture is the practice of growing plants to fulfill human needs for food, fiber, and bioenergy. Various factors can limit the crop production process in agriculture [1], with weeds being one of the most significant. Weeds generally refer to plant species that grow spontaneously in natural environments without human cultivation. These plants are not intentionally grown for agriculture or horticulture but emerge naturally. Weeds may be native to a specific region and are often considered undesirable in fields, gardens, or lawns [2]. While some weeds can be harmful, others contribute to the natural balance. Certain weeds offer nutritional value and can be utilized in traditional medicine or cooking. Despite their occasional benefits, weeds are typically seen as undesirable due to the damage they cause to agricultural fields, gardens, and ecosystems. One of the primary negative effects of weeds is their competition with

Öz

Yabancı ot türlerinin etkili bir şekilde tespiti, verimli tarımsal yönetim için kritik öneme sahiptir ve hedefe yönelik yok etme ve optimize edilmiş tarım uygulamalarını mümkün kılar. Bu çalışmada, ResNet, VggNet ve DenseNet derin öğrenme modellerinin farklı yabancı ot türlerini doğru bir şekilde sınıflandırmadaki performanslarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Veri seti, farklı çevresel koşullarda çekilmiş çeşitli yabancı ot türlerine ait yüksek çözünürlüklü görüntülerden oluşmaktadır. Deneysel sonuçlar, bu modellerin birden fazla yabancı ot türünü yüksek doğrulukla tespit etme yeteneğini göstermiştir. Değerlendirme metrikleri, doğruluk, hassasiyet, hatırlama ve hata matrisi, modellerin türler arasındaki ayrımı yapmadaki etkinliğini doğrulamıştır. Test edilen evrişimli sinir ağı mimarileri arasında, VggNet %99.21'lik en yüksek sınıflandırma doğruluğunu sergilemiştir. Sonuçlar, derin öğrenmeye dayalı sınıflandırma sistemlerinin, tarımsal uygulamalar için ölçeklenebilir ve verimli yabancı ot türü tespiti ve yönetimi konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır.

Anahtar kelimeler: Tarımsal yönetim, Sınıflandırma, Derin öğrenme, Çoklu sınıf, Hassas tarım, Yabancı ot türlerinin tanımlanması

agricultural crops and native plants. Weeds compete for essential resources such as water, nutrients, and light, thereby inhibiting the growth of crops [3]. Furthermore, weeds can reduce agricultural yield, as their presence can negatively impact crop development, leading to a smaller harvest. In addition, some weeds serve as hosts for diseases and pests, facilitating the spread of plant diseases and pests. Weed infestations can also increase the labor and costs associated with weed control and land cleaning, resulting in additional time, financial resources, and effort required by agricultural enterprises [4]. Moreover, in natural ecosystems, weeds can outcompete native plant species, disrupting ecological balance and causing biodiversity loss. The negative consequences of weeds on both ecosystems and agricultural land emphasize the importance of effective weed control and management. Among the various control methods, herbicides play a vital role in managing weed

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ebru.yavuz@erdogan.edu.tr (E. Ergün)

Geliş / Received: 03.06.2024 Kabul / Accepted: 16.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1495040

growth [5]. As technological advancements continue to progress, the agricultural sector, in particular, is increasingly adopting technology to replace labor. Weed control methods are evolving alongside these technological developments. One of the most significant innovations in weed management is the use of data analytics. Data analytics employs modern technologies to identify and assess weed densities in agricultural fields. Drones or sensors capture images that detect weeds, and this data can be analyzed using artificial intelligence or machine learning techniques to map weed distribution and assist in targeting herbicide application [6], [7].

The literature on weed species identification and categorization has mainly focused on data analysis-based methods. Numerous studies have investigated the application of artificial intelligence approaches, including deep learning and machine learning, to weed detection [8]. Using techniques such as pattern recognition and data analysis, these methods have identified and categorized different weed species. For example, Espejo-Garcia et al. had introduced a plant identification system that combined features extracted from traditional machine learning classifiers such as support vector machines (SVM), XGBoost and logistic regression. Their system had also used pre-trained convolutional neural networks (CNNs) such as Xception, Inception-ResNet, VggNet, MobileNet and DenseNet. They had evaluated the approach using a dataset containing two crop species - cotton and tomato - and two weed species - black nightshade and velvetleaf. Their results showed that the combination of an SVM with a fine-tuned DenseNet resulted in a micro-F1 score of 99.29% [9]. Hu et al. had proposed a novel graph-based deep learning architecture, Graph Weeds Net (GWN), to identify different weed species from RGB images of complex pastures. Their approach achieved a classification accuracy (CA) of 98.10% [10]. Similarly, Tang et al. had used convolutional neural networks combined with K-means feature learning for weed identification. By using K-means pre-training, they achieved a CA of 92.89% [11]. Trong et al. had developed a classification strategy based on late fusion of deep neural networks (DNNs) to improve the accuracy of weed identification. They had applied their method to two datasets, including the Chonnam National University (CNU) seedling and weed datasets, using five different DNN models such as NasNet, ResNet, Inception-ResNet, MobileNet and VggNet. Their results had shown a CA of 98.77% for the CNU weed dataset and 97.31% for the seedling dataset [12]. Olsen et al. had used an openly available multi-class image dataset of Australian rangeland weed species. This dataset contained 17509 labelled images of eight prominent weed species from northern Australia. They had used benchmark deep learning models, specifically Inceptionv3 and ResNet50, to assess classification performance. These models had achieved average classification accuracies of 95.10% and 95.70% respectively [13]. In addition, Jin et al. had investigated the use of grid cells to train deep learning models for accurate identification of weed locations in photographs. They evaluated several neural networks, including DenseNet, EfficientNetV2, ResNet, RegNet and VggNet, for the detection and

differentiation of weed species in turfgrass. VggNet stood out by achieving an F1 score of 0.950 for identifying common dandelion and F1 scores of ≥ 0.983 for recognizing subspecies such as dallisgrass, purple nutsedge and white clover. In addition, multi-classification approaches using DenseNet, EfficientNetV2 and RegNet achieved F1 scores of ≥ 0.984 for the detection of dallisgrass and purple nutsedge. In their study, EfficientNetV2 also excelled in a binary classification framework, achieving F1 scores of ≥ 0.981 for distinguishing turfgrass from weeds [14].

These studies have highlighted the critical importance of effective weed control strategies in achieving high agricultural yields. To control weeds with uneven spatial distribution patterns, herbicides were applied by ground or aerial robots. Before herbicides are applied, computer vision algorithms detect weeds in the field, making these algorithms central to the herbicide application process. As a result, large datasets of agricultural weeds were essential for the development of advanced computer vision algorithms. This work used deep learning algorithms to detect weeds for precision herbicide application. Weed classification was performed using an image dataset previously reported in [15]. This study further advanced computer vision-based weed detection techniques for in-field spot spraying applications. In addition, by emphasizing the ability of computer vision models to extract weed-related information from complex backgrounds, it extended the applicability of weed identification to difficult areas within crop fields.

The structure of this manuscript is organized as follows: Section 2 presents the experimental setup, including a comprehensive description of the image dataset and the methodologies employed. Section 3 discusses the experimental findings and evaluates the performance of the proposed approach against several deep learning classification methods. Lastly, Section 4 concludes the study with a summary of the key insights and implications.

2 Materials and methods

2.1 Comprehensive data description

The dataset used in this study focused on categorizing weed species to facilitate precision pesticide application. The data was collected by Rai et al. [15] who collected image data in two categories: aerial weed images and individual weed images. However, only the individual weed category was used in this study. To replicate real world conditions, plants were placed close together to mimic a natural field environment. Aerial photographs were then used to identify and extract individual weeds for further analysis. Data were collected from three different sites, all following consistent field organization and image collection protocols. North Dakota State University (NDSU) collected the data from these sites in the United States [15].

The dataset contains 3975 photographs of five common weed species in North Dakota: waterhemp (*amaranthus tuberculatus*), kochia (*bassia scoparia*), ragweed (*ambrosia artemisiifolia*), horseweed (*erigeron canadensis*), and redroot pigweed (RRPW) (*amaranthus retroflexus*). The greenhouse data set was collected under varying light and background conditions over several days and times. Field data were

collected using a DJI Phantom 4 Pro (V2.0), a commercially available unmanned aerial system (UAS). To ensure that the data accurately represented real-world conditions, several field factors were taken into account, including different background textures, vegetation masking, shadows, image blur, and the presence of similar-looking objects and weeds. The dataset is available in two compressed files in the Mendeley repository: Aerial_Weeds.rar and Individual_Weed.rar.

The Aerial_Weeds.rar file contains the ‘images’ and ‘labels’ folders. The ‘labels’ folder is further subdivided into three subfolders for different label formats (JSON, TXT, XML), while the ‘images’ folder contains high resolution JPG aerial images. A similar hierarchical structure is followed in the Individual_Weed.rar file, where photos and labels for each weed species are organised within their respective species classes. Figure 1 illustrates the class design of a particular weed category as defined by Rai et al.

The aerial photographs were taken at a resolution of 5472×3648 pixels and saved in JPG format. Details of these images are given in Table 1, with the data divided into four weed species types. The individual weed dataset was developed by extracting specific classes of each weed species from aerial images, followed by manual annotation in multiple formats. To increase the diversity of the training set, a small number of photographs taken in greenhouses using a Canon 90D handheld camera were also included. After manually annotating 3424 photographs, a total of 7700 trials were generated across the four weed groups. Figure 2 shows the weed species trials together with the annotated photographs exported in various formats.

To increase the size and diversity of the dataset, data augmentation techniques were used by Rai et al. [15], [16]. The original dataset consisted of 785 photos of kochia, 448 of horseweed, 355 of ragweed and 115 of RRPW. Various augmentation methods were applied to these images and the final output is summarized in Table 1. Furthermore, Rai et

al. conducted image collection in Casselton during late May and early June of 2021, while data from Carrington was gathered between mid-July and late August of the same year. At Grand Farm, image acquisition took place from mid-August to the end of September in 2022. Altogether, this effort resulted in the collection of two years’ worth of image data.

Table 1. Distribution of images for each weed species [15]

Individual Weed	Weed Species				Total
	Kochia	Horseweed	Ragweed	RRPW	
Total images	1150	1032	878	364	3424
Total instances	2600	1700	2000	1400	7700

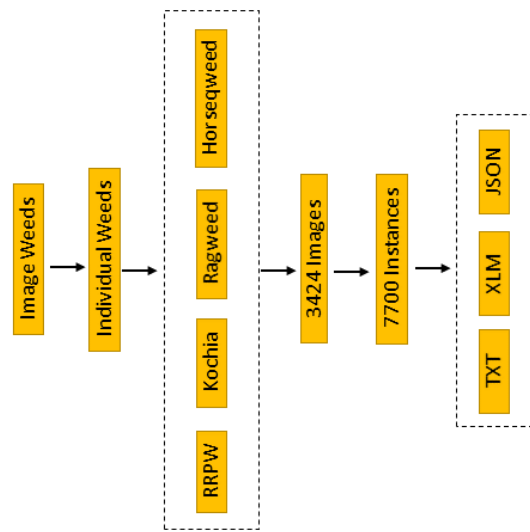


Figure 1. Flowchart folder representation of weed species [15]

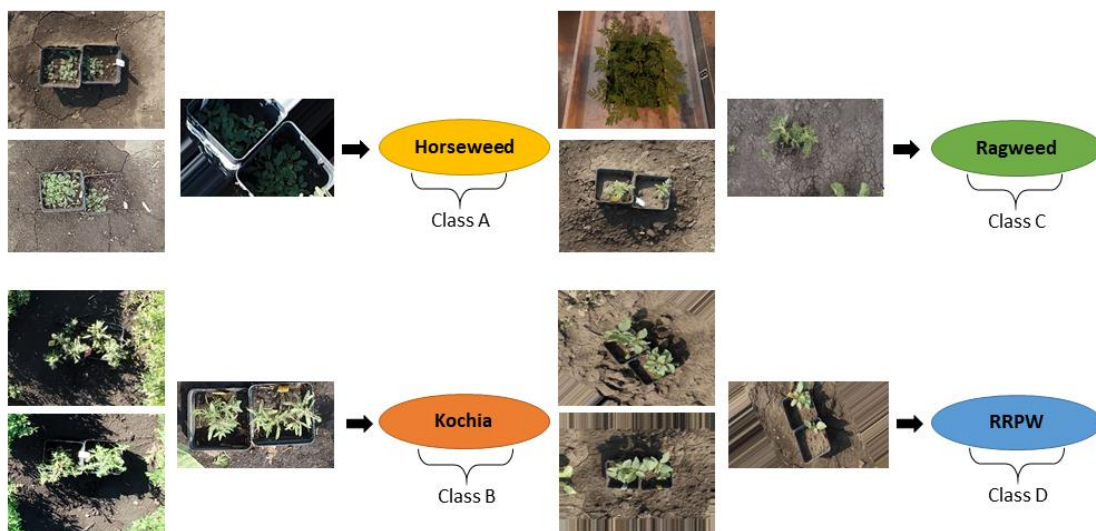


Figure 2. Individual weed species from cropped original images [15]

2.2 Methods

CNNs are a specific class of deep learning models that excel at processing visual data, particularly images [17]. Their architecture is designed to automatically extract hierarchical patterns and relationships within input data, enabling the identification of spatial structures. A key component of CNNs is the convolutional layer, which uses filters or kernels to scan the input data and capture basic features such as edges, textures and shapes. These filters traverse the input data, allowing the network to recognize different aspects of the image. Pooling layers are incorporated to reduce the spatial size of the feature maps and focus the network's attention on the most relevant features [18].

Common pooling strategies include average pooling and maximum pooling. To enhance the network's ability to model complex patterns, activation functions such as the rectified linear unit introduce non-linearity. In the final layers, fully connected layers connect neurons across successive layers, enabling the model to learn higher-level abstractions and make accurate predictions. CNNs have had a profound impact on several fields, particularly computer vision, due to their ability to automatically learn complex feature hierarchies, and have achieved significant success in tasks such as image classification, object detection, and face recognition [19].

The design of CNNs, in particular the convolutional and pooling layers, allows for the efficient capture of spatial dependencies in visual data, which contributes to their success in these applications [20]. The architecture used in this research is illustrated in Figure 3, which shows the overall methodology. In this design, the convolution and pooling layers form the initial stages of the network, while the final stages consist of a fully connected layer followed by a categorization layer. In essence, CNNs consist of successive trainable segments culminating in a discriminative classifier [21]. The layers work together to perform the training process, starting with the collection of input data. CNN architectures, ResNet, VggNet and DenseNet, were used to classify the four classes of weed images used in this study. All classification tasks were performed on a computer equipped with 16 GB of RAM and an Intel Core i7 processor running at 2.92 GHz.

2.2.1 ResNet

The ResNet architecture addresses the vanishing gradient problem common to very deep neural networks [22]. This problem, where gradients diminish as they move backwards through layers, can make it difficult for early layers to learn effectively. ResNet introduces residual learning, which allows the network to learn residual mappings rather than the full intended mappings directly.

The main feature of ResNet architectures is the inclusion of residual blocks, which contain shortcut connections that bypass certain layers. These shortcuts improve the flow of gradients during backpropagation, helping to mitigate problems such as the vanishing gradient problem and facilitating the training of very deep networks. In each residual block, the input is combined with the output of the convolutional layers, promoting a more efficient learning process.

ResNet models typically use global mean pooling, followed by fully connected layers and a softmax layer for classification tasks [23]. This design has proven highly effective in tasks such as image classification, object detection and semantic segmentation. ResNet has achieved cutting-edge performance on popular datasets such as ImageNet, and its robust results have made it a staple in many computer vision applications.

2.2.2 VggNet

VggNet is designed primarily as a series of convolutional layers, each followed by a max-pooling layer for downsampling, ensuring that the network remains simple and uniform in structure [24]. A notable feature of VggNet is the use of small filter sizes, such as 1×1 convolutional layers combined with 3×3 filters, which help to reduce dimensionality while capturing fine-grained features in the input images. This approach allows the network to effectively detect intricate details across images. In addition, the depth of the VggNet is another defining characteristic, with the network stacking multiple convolutional layers, enhancing its ability to learn increasingly discriminative and hierarchical representations of features [25]. The depth of the network contributes significantly to its performance, as each additional layer helps to refine the feature extraction process. In the later stages of the network, VggNet includes fully

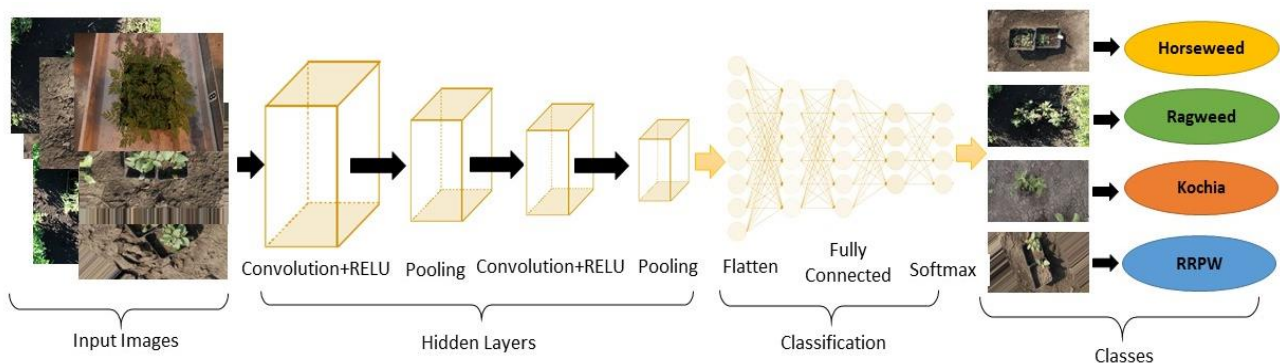


Figure 3. The general architecture of CNNs typically consists of convolutional and pooling layers

connected layers, followed by a softmax classifier to perform image classification. VggNet is also available in different configurations, such as Vgg16 and Vgg19, which differ mainly in the number of layers. Vgg16 consists of 16 weighting layers, while Vgg19 has 19 weighting layers [25]. These variations allow the network to be tailored for different levels of complexity, depending on the specific requirements of the task. VggNet has achieved remarkable success in image classification benchmarks, demonstrating its ability to learn robust and detailed feature representations. Its simple architecture and design principles have made it a popular choice for computer vision researchers and practitioners [26].

2.2.3 DenseNet

DenseNet is a neural network architecture introduced by Huang et al. [27]. The distinguishing feature of DenseNet is its dense connectivity, which differs from traditional architectures such as ResNet by connecting each layer to every other layer in a feed-forward fashion. In this configuration, each layer receives feature maps from all previous layers and forwards its own feature maps to all subsequent layers within a dense block, promoting extensive information sharing throughout the network. Dense blocks are the core elements of DenseNet. Each dense block consists of several layers, including activation, batch normalization, and convolutional layers, which work together in a tightly coupled fashion. Later layers in the block receive the accumulated feature maps from earlier layers, allowing efficient feature propagation and reuse throughout the network. DenseNet also incorporates a parameter called the growth rate, which determines the number of additional feature maps generated at each layer within a dense block, directly influencing the width of the network and its capacity for feature learning [28].

Between dense blocks, DenseNet uses transition layers that manage the spatial dimensions and regulate the number of feature mappings. These transition layers often consist of convolution, batch normalization, and pooling operations that effectively adjust the number of channels and downsample feature mappings. DenseNet also includes bottleneck layers, typically implemented as 1×1 convolutions, which streamline the computational requirements by reducing the input feature maps prior to the computationally intensive 3×3 convolutions. For classification tasks, DenseNet concludes with global average pooling, a fully connected layer and a softmax classifier, enabling the network to provide class predictions. DenseNet's densely connected architecture encourages feature reuse, facilitates effective gradient flow, and improves information transfer across layers, contributing to robust feature propagation. This structure effectively mitigates problems such as the vanishing gradient problem, supporting more efficient training and improved performance [29].

2.3 Classification metrics

Classification is a fundamental concept in machine learning and statistics, involving the categorization of data

into distinct categories or classes based on specific features. The primary goal is to develop a model that can accurately predict the category of unseen data by learning patterns from a training data set. In this study, CA was used as a performance metric, calculated using the confusion matrix [30]. A multiclass confusion matrix is a tabular representation of the performance of a classification algorithm for multiple classes. It is structured as a square matrix, with rows representing the actual classes and columns representing the predicted classes. Each cell reflects the number of instances from a particular actual class that were predicted to belong to a particular class.

For example, Table 2 displays a confusion matrix for a four-class problem, A, B, C, and D. The rows correspond to the actual classes, while the columns represent the predicted classes [31]. The diagonal cells contain the number of correctly classified examples, such as the number of instances of class A that were correctly predicted as class A. Off-diagonal cells indicate misclassifications, such as the number of instances of class B that were incorrectly classified as class C. This matrix provides valuable insight into the performance of the model across all classes, allowing a detailed evaluation of its effectiveness.

Table 2. Four-class confusion matrix

Confusion Matrix	Predicted Classes			
	Predicted Class A	Predicted Class B	Predicted Class C	Predicted Class D
Actual Class A	AP1	BP1	BN1	BN1
Actual Class B	BN2	AP2	BP2	BN2
Actual Class C	BN3	BN3	AP3	BP3
Actual Class D	BN4	BN4	BP4	AP4

A multi-class classification problem with four categories, Class A, Class B, Class C and Class D, is represented by the confusion matrix shown in Table 2. Each cell in this matrix quantifies the number or frequency of instances belonging to a particular true class and its corresponding predicted class. For example, the correctly classified instances of class A are represented as AP1, while BP1 denotes instances that were misclassified as class A but actually belong to another class. Similarly, the matrix contains entries for true positives (AP), false positives (BP) and false negatives (BN) for each class. The overall CA for a four-class problem can be derived from this confusion matrix using Equation 1. The total number of trials is represented by the sum of all entries in the matrix, which includes correctly and incorrectly classified instances across all classes: $AP1 + BP1 + BN1 + BN1 + BN2 + AP2 + BP2 + BN2 + BN3 + BN3 + AP3 + BP3 + BN4 + BN4 + BP4 + AP4$. This comprehensive representation allows a detailed evaluation of the performance of the classification model.

Recall (RC) and Precision (PRC) are key performance metrics used to assess the effectiveness of classification models, particularly in multi-class classification scenarios [32]. PRC quantifies the accuracy of the model's positive predictions for each specific class. In a multi-class classification with four classes, the accuracy for each class is determined by the ratio of true positives to the total number

of predicted instances for that class [33]. On the other hand, RC measures the ability of the model to correctly identify all instances that belong to a particular class out of the total number of instances that truly belong to that class. For each class in a four-class classification task, recall is calculated as the ratio of true positives to the total number of true instances of that class. Equations 2 and 3 define the mathematical expressions for RC and PRC respectively. In Equation 2, the variable Ax is the sum of the true positives and false negatives for each class: $Ax = AP1 + BN1 + AP2 + BN2 + AP3 + BN3 + AP4 + BN4$. In Equation 3, Ab represents the sum of the true positives and false positives for each class: $Ab = AP1 + BP1 + AP2 + BP2 + AP3 + BP3 + AP4 + BP4$. These formulas allow the calculation of the recall and precision values, which are crucial for understanding the performance of the classification model.

$$CA = \frac{(AP1 + AP2 + AP3 + AP4)}{\text{Total trials}} \times 100 \quad (1)$$

$$RC = \frac{(AP1 + AP2 + AP3 + AP4)}{Ax} \times 100 \quad (2)$$

$$PRC = \frac{(AP1 + AP2 + AP3 + AP4)}{Ab} \times 100 \quad (3)$$

3 Results

In this study, transfer learning techniques were used for weed species classification. The starting point for training was the pre-trained parameters of three CNN models, ResNet, VggNet and DenseNet. These models, which are widely used for large datasets such as ImageNet, benefit from their ability to use extensive pre-training. The images within the ImageNet dataset are standardized to a resolution of 224×224 pixels, a size that balances computational efficiency with optimal performance for deep neural networks. Accordingly, all training and test images in this study were resized to 224×224 pixels prior to experimentation. A 5-fold cross-validation approach was used to evaluate model performance, and details of the CNN architectures used are shown in Table 3.

During training, the first five layers of the VggNet model were frozen to preserve pre-trained features, while batch sizes varied between 8 and 128 depending on the performance of each model. Of the architectures, DenseNet had the smallest number of layers and parameters, while VggNet had the simplest structure with 24 layers. All models were trained for 20 epochs at a learning rate of 0.001, and the best performing parameters based on validation set accuracy were selected for testing. To comprehensively assess the performance of the models, evaluation metrics such as accuracy, precision, recall and the confusion matrix were used, particularly due to the unbalanced distribution of the weed species dataset.

For model evaluation, 80% of the dataset was used for training and validation to optimize the CNN parameters, while the remaining 20% was reserved for testing. The dataset consisted of 3424 images for each weed species, randomly divided into training and test sets. Specifically, the training set contained 1032, 1150, 878, and 364 images for horseweed, kochia, ragweed, and redroot pigweed,

respectively, while the test set contained 207, 230, 175, and 73 images for these classes. The results of the confusion matrix for the ResNet architecture during the 5-fold cross-validation are shown in Figure 4. As shown in Figure 4a, the CA for the first fold reached 99.00%, with 207 trials of class A, 223 trials of class B, 175 trials of class C and 73 trials of class D being correctly classified.

Table 3. Details of the CNN architectures used in the study

Model	Parameters				
	Batch size	Number of layers	Max Epochs	Optimizer	Base learning rate
ResNet	8	72	15	SGD	0.0001
VggNet	8	41	15	SGD	0.0001
DenseNet	8	709	15	SGD	0.0001

As depicted in Figure 4b, the classification accuracy (CA) for the second fold was 98.10%. In this fold, 205 trials of class A, 230 trials of class B, 166 trials of class C, and 71 trials of class D were accurately classified. Moving to the third fold, shown in Figure 4c, the CA increased to 99.10%, with correct classifications of 206 trials for class A, 229 for class B, 173 for class C, and 71 for class D. For the fourth fold, represented in Figure 4d, the CA was calculated as 98.80%. Specifically, 202 trials of class A, 228 of class B, 175 of class C, and 72 of class D were classified correctly. Similarly, the fifth fold achieved a CA of 99.00%, as shown in Figure 4e. In this case, 206 trials of class A, 227 of class B, 173 of class C, and 71 of class D were accurately identified. Finally, Figure 4f illustrates the combined confusion matrix for the 5-fold cross-validation. The average results show that 205.20 trials of class A, 227.40 of class B, 172.40 of class C, and 71.60 of class D were correctly classified across all folds.

Figure 5 showed the confusion matrix result for each fold of the 5-fold cross-validation using the VggNet architecture. The first fold had a CA of 99.70%, as shown in Figure 5a. Specifically, 206 trials were correctly classified as class A, 229 trials as class B, 175 trials as class C, and 73 trials as class D. Furthermore, a CA of 98.50% was calculated for the second fold, as shown in Figure 5b. Specifically, 204 trials were correctly classified as class A, 228 trials as class B, 173 trials as class C, and 70 trials as class D. In Figure 5c, the third fold had a CA of 99.10% and 205 class A trials, 226 class B trials, 175 class C trials and 73 class D trials were correctly classified. For the fourth fold, shown in Figure 5d, a CA of 99.00% was obtained and 200 trials of class A, 230 trials of class B, 175 trials of class C and 73 trials of class D were correctly classified. Furthermore, as shown in Figure 5e, the 5-fold had a CA of 99.70% and 206 trials of class A, 228 trials of class B, 176 trials of class C and 72 trials of class D were correctly classified. Figure 5f showed the 5-fold validation confusion matrix. In this case 204.20, 228.20, 172.80 and 72.20 trials of class A, B, C and D respectively were correctly classified.

Figure 6 illustrated the confusion matrix results for each fold of the 5-fold cross-validation using the DenseNet architecture. In the first fold, as shown in Figure 6a, CA

Confusion Matrix: Resnet

Output Class	A	207 30.2%	6 0.9%	0 0.0%	0 0.0%	97.2% 2.8%
	B	0 0.0%	223 32.6%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	C	0 0.0%	1 0.1%	175 25.5%	0 0.0%	99.4% 0.6%
	D	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	73 10.7%	100% 0.0%
		100% 0.0%	97.0% 3.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	99.0% 1.0%
	A	B	C	D	Target Class	

a)

Confusion Matrix: Resnet

Output Class	A	205 29.9%	0 0.0%	1 0.1%	1 0.1%	99.0% 1.0%
	B	0 0.0%	230 33.6%	7 1.0%	1 0.1%	96.6% 3.4%
	C	1 0.1%	0 0.0%	166 24.2%	0 0.0%	99.4% 0.6%
	D	1 0.1%	0 0.0%	1 0.1%	71 10.4%	97.3% 2.7%
		99.0% 1.0%	100% 0.0%	94.9% 5.1%	97.3% 2.7%	98.1% 1.9%
	A	B	C	D	Target Class	

b)

Confusion Matrix: Resnet

Output Class	A	206 30.1%	0 0.0%	3 0.4%	0 0.0%	98.6% 1.4%
	B	0 0.0%	229 33.4%	0 0.0%	1 0.1%	99.6% 0.4%
	C	0 0.0%	1 0.1%	173 25.3%	1 0.1%	98.9% 1.1%
	D	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	71 10.4%	100% 0.0%
		100% 0.0%	99.6% 0.4%	98.3% 1.7%	97.3% 2.7%	99.1% 0.9%
	A	B	C	D	Target Class	

c)

Confusion Matrix: Resnet

Output Class	A	202 29.5%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	99.5% 0.5%
	B	2 0.3%	228 33.3%	1 0.1%	0 0.0%	98.7% 1.3%
	C	2 0.3%	1 0.1%	175 25.5%	1 0.1%	97.8% 2.2%
	D	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	72 10.5%	100% 0.0%
		98.1% 1.9%	99.1% 0.9%	99.4% 0.6%	98.6% 1.4%	98.8% 1.2%
	A	B	C	D	Target Class	

d)

Confusion Matrix: Resnet

Output Class	A	206 30.1%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	99.5% 0.5%
	B	0 0.0%	227 33.2%	2 0.3%	1 0.1%	98.7% 1.3%
	C	0 0.0%	2 0.3%	173 25.3%	0 0.0%	98.9% 1.1%
	D	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	71 10.4%	98.6% 1.4%
		100% 0.0%	98.7% 1.3%	98.3% 1.7%	98.6% 1.4%	99.0% 1.0%
	A	B	C	D	Target Class	

e)

Confusion Matrix	Predicted Classes			
	Predicted Class A	Predicted Class B	Predicted Class C	Predicted Class D
Actual Class A	205.20	0.40	0.60	0.20
Actual Class B	1.60	227.40	1.00	0.00
Actual Class C	0.80	2.00	172.40	0.40
Actual Class D	0.20	0.60	0.40	71.60

f)

Figure 4. Confusion matrix result of a) 1st, b) 2nd, c) 3rd, d) 4th, e) 5th fold and f) mean 5-fold validation for ResNet

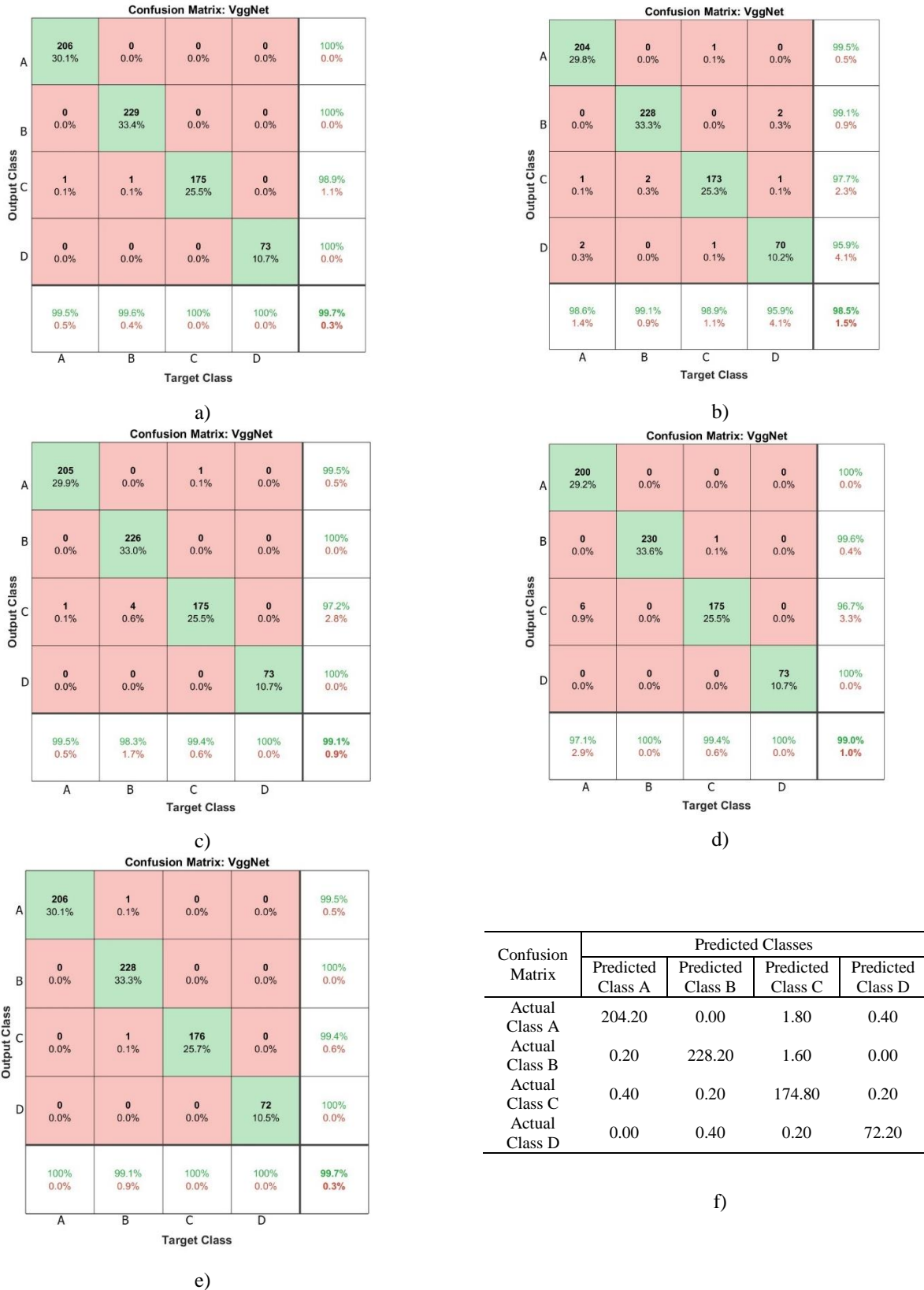


Figure 5. Confusion matrix result of a) 1st, b) 2nd, c) 3rd, d) 4th, e) 5th fold and f) mean 5-fold validation for VggNet

Confusion Matrix: DesneNet

Output Class	A	206 30.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	B	0 0.0%	230 33.6%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	C	1 0.1%	0 0.0%	175 25.5%	0 0.0%	99.4% 0.6%
	D	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	73 10.7%	100% 0.0%
		99.5% 0.5%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	99.9% 0.1%
	A	B	C	D		Target Class

a)

Confusion Matrix: DenseNet

Output Class	A	201 29.3%	0 0.0%	1 0.1%	2 0.3%	98.5% 1.5%
	B	0 0.0%	229 33.4%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	C	5 0.7%	1 0.1%	173 25.3%	1 0.1%	96.1% 3.9%
	D	1 0.1%	0 0.0%	1 0.1%	70 10.2%	97.2% 2.8%
		97.1% 2.9%	99.6% 0.4%	98.9% 1.1%	95.9% 4.1%	98.2% 1.8%
	A	B	C	D		Target Class

b)

Confusion Matrix: DenseNet

Output Class	A	206 30.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	B	0 0.0%	230 33.6%	1 0.1%	0 0.0%	99.6% 0.4%
	C	0 0.0%	0 0.0%	175 25.5%	1 0.1%	99.4% 0.6%
	D	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	72 10.5%	100% 0.0%
		100% 0.0%	100% 0.0%	99.4% 0.6%	98.6% 1.4%	99.7% 0.3%
	A	B	C	D		Target Class

c)

Confusion Matrix: DenseNet

Output Class	A	204 29.8%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	99.5% 0.5%
	B	1 0.1%	229 33.4%	2 0.3%	1 0.1%	98.3% 1.7%
	C	1 0.1%	0 0.0%	174 25.4%	2 0.3%	98.3% 1.7%
	D	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	70 10.2%	100% 0.0%
		99.0% 1.0%	99.6% 0.4%	98.9% 1.1%	95.9% 4.1%	98.8% 1.2%
	A	B	C	D		Target Class

d)

Confusion Matrix: DenseNet

Output Class	A	205 30.0%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	99.5% 0.5%
	B	0 0.0%	226 33.0%	5 0.7%	0 0.0%	97.8% 2.2%
	C	0 0.0%	3 0.4%	171 25.0%	0 0.0%	98.3% 1.7%
	D	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	72 10.5%	98.6% 1.4%
		99.5% 0.5%	98.3% 1.7%	97.2% 2.8%	100% 0.0%	98.5% 1.5%
	A	B	C	D		Target Class

e)

Confusion Matrix	Predicted Classes			
	Predicted Class A	Predicted Class B	Predicted Class C	Predicted Class D
Actual Class A	204.40	0.20	1.40	0.40
Actual Class B	0.40	228.80	1.80	0.00
Actual Class C	0.20	1.60	173.60	0.20
Actual Class D	0.40	0.20	0.80	71.40

f)

Figure 6. Confusion matrix result of a) 1st, b) 2nd, c) 3rd, d) 4th, e) 5th fold and f) mean 5-fold validation for DenseNet

reached 99.90%, with correct classifications of 206 trials for class A, 230 for class B, 175 for class C, and 73 for class D. For the second fold, depicted in Figure 6b, the CA was calculated as 98.20%, with 201 trials correctly classified as class A, 229 as class B, 173 as class C and 70 as class D. The third fold achieved a CA of 99.70%, with 206 trials correctly classified as class A, 230 as class B, 175 as class C and 72 as class D. The fourth fold, illustrated in Figure 6d, achieved a CA of 98.80%, with 204 trials correctly classified as class A, 229 as class B, 174 as class C, and 70 as class D. Lastly, as shown in Figure 6e, the fifth fold recorded a CA of 98.50%, with 205 trials correctly classified as class A, 226 as class B, 171 as class C and 72 as class D. The overall results for the 5-fold validation are summarized in Figure 6f, with the average number of correctly classified trials being 204.40 for class A, 228.80 for class B, 173.60 for class C and 71.40 for class D.

The classification results for CA, RC and PCR for all CNN architectures are shown in Table 4. As shown in the table, the highest CA is achieved by VggNet with 99.21%. The CA achieved with VggNet exceeds that of ResNet and DenseNet by 0.41% and 0.17% respectively. Furthermore, the RC values were calculated as 98.70%, 99.22% and 98.86% for ResNet, VggNet and DenseNet respectively, while the PCR values were calculated as 98.87%, 99.15% and 99.03%, respectively. These CA results highlight the effectiveness of the VggNet architecture in classifying these 4-class weed images. In addition to the results, an example image obtained from the training process for each weed images class is shown in Figure 7.

Table 4. Classification results for each CNN architecture

Model	Classification Results (%)		
	CA	RC	PRC
ResNet	98.80	98.70	98.87
VggNet	99.21	99.22	99.15
DenseNet	99.04	98.86	99.03

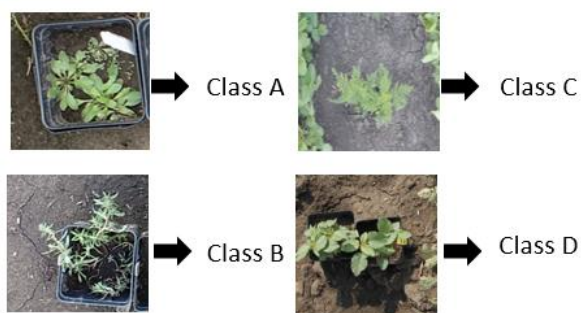


Figure 7. Example image for each weed image class

Table 5 showed the average central processor (CPU) times for training three deep learning models: VggNet, ResNet and DenseNet. Of these, VggNet had the shortest processing time, with an average of 350.03 minutes, due to its relatively simpler architecture. ResNet required more time, with an average of 425.15 minutes, reflecting the

additional computational overhead introduced by its residual links. DenseNet, with its densely connected layers, had the highest CPU time of 530.20 minutes, highlighting the increased computational demands of its complex structure. These results demonstrate the correlation between model complexity and CPU time, with more complex architectures tending to require greater computational resources.

Table 5. Average central processor time results

Results in terms of minutes	Each CNN architecture		
	VggNet	ResNet	DenseNet
Average CPU time	350.03	425.15	530.20

4 Conclusion

This study represents a significant advance in the accurate and simultaneous identification of multiple weed species using deep learning techniques, in particular the VggNet model. The exceptional performance of VggNet, which achieved an impressive CA of 99.21%, highlights its effectiveness in accurately distinguishing between different weed species. The inclusion of high resolution images from different environmental conditions in the dataset further emphasizes the robustness and adaptability of the proposed models. A thorough evaluation using metrics such as accuracy, precision, recall and confusion matrix analysis highlights the effectiveness of the deep learning models in addressing the challenges of weed species discrimination. These results highlight the potential of integrating deep learning-based classification systems into agricultural practices. Such systems can provide scalable and efficient solutions for weed identification and management, thereby supporting precision agriculture and increasing crop productivity.

Future research can explore the integration of additional environmental and biological factors to further refine model performance, and expand the dataset to include more weed species and scenarios. The promising results of this study lay the foundation for the development of automated, non-invasive tools that can significantly contribute to sustainable agricultural practices.

Declaration of competing interest

The authors declare that none of the work reported in this study could have been influenced by any known competing financial interests or personal relationships.

Similarity rate (iThenticate): 19%

References

- [1] F. Ahmed, H. A. Al-Mamun, A. H. Bari, E. Hossain, & P. Kwan, Classification of crops and weeds from digital images: A support vector machine approach. *Crop Protection*, 40, 98-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.04.024>.
- [2] T. Luo, J. Zhao, Y. Gu, S. Zhang, X. Qiao, W. Tian & Y. Han, Classification of weed seeds based on visual images and deep learning. *Information Processing in*

- Agriculture, 10(1), 40-51, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.10.002>.
- [3] R. Bongiovanni, and J. Lowenberg-DeBoer, Precision agriculture and sustainability. *Precision agriculture*, 5, 359-387, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>.
- [4] A. S. Baghel, A. Bhardwaj and W. Ibrahim, Optimization of Pesticides Spray on Crops in Agriculture using Machine Learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9408535>.
- [5] R. Gerhards, D. Andujar Sanchez, P. Hamouz, G. G. Peteinatos, S. Christensen and C. Fernandez-Quintanilla, Advances in site-specific weed management in agriculture—A review. *Weed Research*, 62(2), 123-133, 2022. <https://doi.org/10.1111/wre.12526>.
- [6] A. Monteiro, and S. Santos, Sustainable approach to weed management: The role of precision weed management. *Agronomy*, 12(1), 118, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010118>.
- [7] M. Z. Alom, T. M. Taha, C. Yakopcic, S. Westberg, P. Sidike, M. S. Nasrin and V. K. Asari, The history began from alexnet: A comprehensive survey on deep learning approaches. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.01164>.
- [8] S. Khan, M. Tufail, M. T. Khan, Z. A. Khan and S. Anwar, Deep learning-based identification system of weeds and crops in strawberry and pea fields for a precision agriculture sprayer. *Precision Agriculture*, 22(6), 1711-1727, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09808-9>.
- [9] B. Espejo-Garcia, N. Mylonas, L. Athanasakos, S. Fountas and I. Vasilakoglou, Towards weeds identification assistance through transfer learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105306, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105306>.
- [10] K. Hu, G. Coleman, S. Zeng, Z. Wang and M. Walsh, Graph weeds net: A graph-based deep learning method for weed recognition. *Computers and electronics in agriculture*, 174, 105520, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105520>.
- [11] J. Tang, D. Wang, Z. Zhang, L. He, J. Xin and Y. Xu, Weed identification based on K-means feature learning combined with convolutional neural network. *Computers and electronics in agriculture*, 135, 63-70, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.001>.
- [12] V. H. Trong, Y. Gwang-hyun, D. T. Vu and K. Jin-young, Late fusion of multimodal deep neural networks for weeds classification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105506, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105506>.
- [13] A. Olsen, D. A. Konovalov, B. Philippa, P. Ridd, J. C. Wood, J. Johns and R. D. White, DeepWeeds: A multiclass weed species image dataset for deep learning. *Scientific reports*, 9(1), 2058, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38343-3>.
- [14] X. Jin, M. Bagavathiannan, P. E. McCullough, Y. Chen and J. Yu, A deep learning-based method for classification, detection, and localization of weeds in turfgrass. *Pest Management Science*, 78(11), 4809-4821, 2022. <https://doi.org/10.1002/ps.7102>.
- [15] N. Rai, M. V. Mahecha, A. Christensen, J. Quanbeck, Y. Zhang, K. Howatt and X. Sun, Multi-format open-source weed image dataset for real-time weed identification in precision agriculture. *Data in Brief*, 51, 109691, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109691>.
- [16] TzutalinLabelImg v1.8.1 (Version 1.8.1), <https://github.com/HumanSignal/labelImg>.
- [17] T. Tao, & X. Wei, A hybrid CNN-SVM classifier for weed recognition in winter rape field. *Plant Methods*, 18(1), 29, 2022. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00869-z>.
- [18] M. Manikandakumar & P. Karthikeyan, Weed classification using particle swarm optimization and deep learning models. *Comput. Syst. Sci. Eng.*, 44(1), 913-927, 2023. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.025434>.
- [19] W. Rawat and Z. Wang, Deep convolutional neural networks for image classification: A comprehensive review. *Neural computation*, 29(9), 2352-2449, 2017. https://doi.org/10.1162/neco_a_00990.
- [20] J. C. Chen, T. L. Chen, H. L. Wang and P. C. Chang, Underwater abnormal classification system based on deep learning: A case study on aquaculture fish farm in Taiwan. *Aquacultural Engineering*, 99, 102290, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102290>.
- [21] A. Paul, R. Machavaram, D. Kumar & H. Nagar, Smart solutions for capsicum Harvesting: Unleashing the power of YOLO for Detection, Segmentation, growth stage Classification, Counting, and real-time mobile identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219, 108832, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108832>.
- [22] A. Sagingalieva, M. Kordzanganeh, A. Kurkin, A. Melnikov, D. Kuhmistrov, M. Perelshtein and D. V. Dollen, Hybrid quantum ResNet for car classification and its hyperparameter optimization. *Quantum Machine Intelligence*, 5(2), 38, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42484-023-00123-2>.
- [23] A. Pandey and K Jain, An intelligent system for crop identification and classification from UAV images using conjugated dense convolutional neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106543, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106543>.
- [24] J. Wei, Y. Ibrahim, S. Qian, H. Wang, G. Liu, Q. Yu and J. Shi, Analyzing the impact of soft errors in VGG networks implemented on GPUs. *Microelectronics Reliability*, 110, 113648, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113648>.
- [25] A. S. Paymode and V. B. Malode, Transfer learning for multi-crop leaf disease image classification using convolutional neural network VGG. *Artificial*

- Intelligence in Agriculture, 6, 23-33, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2021.12.002>.
- [26] X. Zhang, Y. Qiao, Meng, F., Fan, C., & Zhang, M. (2018). Identification of maize leaf diseases using improved deep convolutional neural networks. IEEE Access, 6, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2844405>.
- [27] Lu, T., Han, B., L. Chen, F. Yu and C. Xue, A generic intelligent tomato classification system for practical applications using DenseNet-201 with transfer learning. Scientific Reports, 11(1), 15824, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95218-w>.
- [28] L. Shan and W. Wang, DenseNet-based land cover classification network with deep fusion. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 1-5, 2021. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3042199>.
- [29] K. Zhang, Y. Guo, X. Wang, J. Yuan and Q. Ding, Multiple feature reweight densenet for image classification. IEEE Access, 7, 9872-9880, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2890127>.
- [30] E. Ergün, Deep learning based multiclass classification for citrus anomaly detection in agriculture. Signal, Image and Video Processing, 18(11), 8077-8088, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11760-024-03452-2>.
- [31] E. Ergün, Artificial intelligence approaches for accurate assessment of insulator cleanliness in high-voltage electrical systems. Electrical Engineering, 1-14, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02691-3>.
- [32] M. Heydarian, T. E. Doyle and R. Samavi, MLCM: Multi-label confusion matrix. IEEE Access, 10, 19083-19095, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151048>.
- [33] M. L. Zhang and Z. H. Zhou, A review on multi-label learning algorithms. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 26(8), 1819-1837, 2013. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2013.39>.





Farklı kodlama tekniklerinin KNN algoritmasının mantar sınıflandırma performansı üzerindeki etkisi

Effect of different encoding techniques on the mushroom classification performance of KNN algorithm

Kadir İleri^{1,*} 

¹ Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, 10200, Balıkesir, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, mantarların zehirli veya yenilebilir olarak sınıflandırılmasında farklı kodlama tekniklerinin K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Etiket kodlama, one-hot kodlama, frekans kodlama, hash kodlama ve hedef kodlama gibi çeşitli kodlama teknikleri kullanılarak, çoğunlukla kategorik özellikler içeren bir veri setindeki kategorik özellikler sayısal verilere dönüştürülmüştür. Modelin performansı doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve f1-skoru gibi metriklerle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, frekans kodlamanın k=1 durumunda en iyi performansı sergilediğini, hedef kodlamanın ise k=7 durumunda en düşük performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmanın bulguları, kategorik veri dönüşümünün KNN modeli üzerindeki etkilerini anlamak ve daha doğru sınıflandırma sonuçları elde etmek için önemli ipuçları sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: KNN sınıflandırıcısı, Kategorik veri, Etiket kodlama, One-hot kodlama, Frekans kodlama

1 Giriş

Makine öğrenimi ve veri bilimi alanları, giderek artan veri miktarı ve bu verilerin işlenmesi gereksinimiyle birlikte hızla gelişmektedir. Özellikle kategorik verilerin etkili bir şekilde kodlanması, makine öğrenimi modellerinin performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir [1]. Kategorik veriler genellikle sınırlı sayıda farklı değere sahip olup, bu değerler sıralı ya da sırasız olabilir. Bu tür veriler, doğrudan makine öğrenimi algoritmalarına giriş olarak verilemez ve bu nedenle, uygun şekilde sayısal değerlere dönüştürülmeleri gerekmektedir [2].

Bu çalışma, çeşitli kodlama tekniklerinin KNN algoritması kullanılarak gerçekleştirilen bir sınıflandırma problemi üzerindeki performansını analiz etmeyi amaçlamaktadır. KNN algoritması, basitliği ve açıklanabilirliği nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir denetimli öğrenme yöntemidir [3]. Ancak, KNN'nin performansı, kullanılan özelliklerin temsiline büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, kategorik verilerin doğru bir şekilde kodlanması, KNN algoritmasının başarısını artırmada kritik bir rol oynar [4].

Abstract

In this study, the effects of different encoding techniques on the K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm in the classification of mushrooms as poisonous or edible were investigated. Various encoding techniques such as label encoding, one-hot encoding, frequency encoding, hash encoding, and target encoding were used to convert categorical features in a dataset, which mostly contains categorical features, into numerical data. The performance of the model was evaluated using metrics such as accuracy, precision, recall, and f1-score. The results revealed that frequency encoding showed the best performance at k=1, while target encoding showed the lowest performance at k=7. The findings of the study provide significant insights into understanding the impact of categorical data transformation on the KNN model and achieving more accurate classification results.

Keywords: KNN classifier, Categorical data, Label encoding, One-hot encoding, Frequency encoding

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen kodlama tekniklerinin, mantar sınıflandırma problemi üzerinde KNN algoritması ile performansları karşılaştırılmıştır. Mantar verileri, biyolojik ve ekolojik araştırmalarda önemli bir rol oynamakta olup, bu tür verilerin zehirli veya yenilebilir olarak sınıflandırılması insan sağlığı için büyük bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışma, farklı k değerlerinde KNN algoritmasının doğruluk ve hata oranlarını analiz ederek, hangi kodlama tekniklerinin daha etkili olduğunu analize etmiştir.

Makalenin geri kalanı şu şekilde tasarlanmıştır. Bölüm 2 literatür taramasını içermektedir. Bölüm 3'te çalışmada kullanılan veri seti tanımlanmıştır. Bölüm 4'te kullanılan metodlar açıklanmıştır. Bölüm 5'te analizler sonucunda elde edilen sonuçlar paylaşılmış ve yorumlanmıştır. Son olarak, Bölüm 6 sonuç kısmını içermektedir.

2 Literatür taraması

Literatürde, kategorik veri dönüşümü için çeşitli yöntemler önerilmiştir. En yaygın olarak kullanılan tekniklerden bazıları etiket kodlama, one-hot kodlama, frekans kodlama, hash kodlama ve hedef kodlamadır [5-14]. Bu tekniklerin her biri, verilerin belirli bir şekilde sayısal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kileri@bandirma.edu.tr (K. İleri)

Geliş / Received: 12.07.2024 Kabul / Accepted: 16.12.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1515387

değerlere dönüştürülmesini sağlar ve her birinin kendi avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, etiket kodlama basit ve hızlıdır, ancak sıralı olmayan verilerde yanlış ilişkiler oluşturabilir. One-hot kodlama, bu sorunu aşar ancak yüksek boyutluluk sorununa neden olabilir. Frekans kodlama, kategorilerin veri setindeki frekanslarına göre kodlanmasını sağlar ve hash kodlama, büyük veri setlerinde bellek tasarrufu sağlarken hash çakışması (aynı değerün üretilmesi durumu) da yaşanabilmektedir. Hedef kodlama ise, kategorilerin hedef değişkenle olan ilişkisine göre kodlanmasını sağlar ancak aşırı uyum riskini taşır [15].

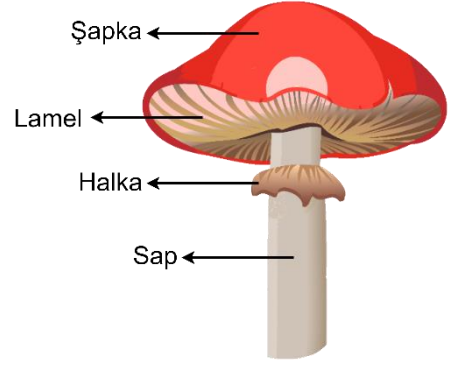
Yapılan çalışmalardan birinde, Ping Yan [5] bozulmuş verileri tespit etmek için meta veri özelliklerini kullanmış ve etkili sınıflandırma için ağaç tabanlı bir makine öğrenme algoritması uygulamıştır. İsveçli otomotiv şirketi Veoneer'den gelen bir sorunu ele alarak, %97 sağlıklı ve %3 bozuk veriden oluşan, tamamen nominal kategorik değişkenler içeren son derece dengesiz bir veri seti kullanılmıştır. Bu kategorik değişkenleri sayısal değişkenlere dönüştürmek için one-hot kodlama tekniği kullanılmıştır. Metodoloji, veri temizleme ve veri kodlama ön işlemlerini içerir. Sınıflandırma işlemi ise rastgele orman algoritması ile yapılmış ve bu algoritmanın parametre optimizasyonu için ise rastgele arama kullanılmıştır. Sonuçlar, bu yaklaşımın sınıflandırma performansını artırdığını ve meta veri özelliklerinin bozuk verileri etkili bir şekilde tespit edebildiğini ve model için kilit özellikleri tanımlayabildiğini göstermiştir. Benzer olarak, Kartik Budholiya vd. [6] kalp hastalığını tahmin etmek için optimize edilmiş bir XGBoost sınıflandırıcısı kullanmışlardır. XGBoost modelinin hiper parametreleri, oldukça verimli bir yöntem olan Bayes optimizasyonu kullanılarak optimize edilmiştir. Veri seti olarak Cleveland kalp hastalığı veri seti kullanılmış ve bu veri setinin içerdiği kategorik özellikleri sayısal verilere dönüştürmek için one-hot kodlama tekniği kullanılmıştır. Modelin etkinliği, rastgele orman ve ekstra ağaç sınıflandırıcıları ile karşılaştırılmıştır. Modellerin performans değerlendirme için doğruluk, duyarlılık, özgüllük, f1-skoru ve ROC eğrisi olmak üzere toplam beş farklı değerlendirme metriği kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen modelin kalp hastalığı tahmininde %91.8 doğruluk elde ederek etkili sınıflandırma işlemi gerçekleştirdiğini göstermiştir. Bir diğer çalışmada, Taher Al-Shehari vd. [7] tehdit olaylarını tespit etmek için makine öğrenmesi tabanlı bir model önermişlerdir. Önerilen model, özellik ölçekleme ve one-hot kodlama ön işlemlerini içermektedir. Ayrıca, kullanılan veri setindeki dengesizlik sorunu, sentetik azınlık aşırı örnekleme tekniği (SMOTE) ile ele alınmıştır. Çalışma, kötü niyetli içeriden kişilerin bir organizasyondan ayrılmadan önce gerçekleştirdiği veri sızıntısı olaylarını tespit edebilecek en doğru sınıflandırıcıyı belirlemek için lojistik regresyon, rastgele orman, destek vektör makinesi, naive bayes, KNN ve karar ağacı makine öğrenmesi algoritmalarını karşılaştırmışlardır. CMU-CERT Insider Threat Dataset adlı veri seti üzerinde modellerin sınıflandırma başarımlarını test edilmiş ve elde edilen sonuçlar rastgele orman ve karar ağacı modellerin diğer modellere göre en yüksek sınıflandırma başarımlarını göstermişlerdir. Ayrıca, aynı veri seti üzerinde

gerçekleştirilen mevcut yaklaşımları performans açısından geride bırakmıştır. Mohamed Hosni [8] ise yazılım geliştirme çabası tahmini (SDEE) veri setlerindeki kategorik verilerin kodlama teknikleriyle nasıl işlenebileceğini üzerine bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, one-hot kodlayıcı, etiket kodlayıcı, frekans kodlayıcı ve hedef kodlayıcı dahil olmak üzere dört kodlayıcı kullanılmıştır. Model olarak ise, KNN, destek vektör makinesi, çok katmanlı algılayıcı ve karar ağacı makine öğrenmesi modelleri kullanılmıştır. Analizler, ISBG, Nasa93, Maxwell ve USP05 olmak üzere toplam dört veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. One-hot kodlayıcı ile üretilen veri setleri, KNN modeli ile en iyi sonuçları vermiş ve daha doğru tahminler yapmasını sağlamıştır. Başka bir çalışmada, Min Xuan Low vd. [9] kötü amaçlı yazılım tespitini hedeflemişlerdir. Bu kapsamda, etiket kodlama ve kanıt sayma olmak üzere iki farklı özellik mühendisliği işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha az önemli özellikleri izole etmek için özellik seçimi uygulanmıştır. Makine öğrenmesi modelleri olarak rastgele orman, karar ağacı, KNN, destek vektör makinesi, çok katmanlı algılayıcı ve uzun kısa süreli bellek sınıflandırıcıları kullanılmıştır. Modellerin performansları, doğruluk, kesinlik, duyarlılık, f1-skoru ve kayıp gibi ölçütler ile değerlendirilmiştir. Rastgele orman ve karar ağacı modelleri, diğer modellere göre daha iyi performans göstermişlerdir. Benzer olarak, Subrata Kumar Das vd. [10] büyük veri setleri için, özellikle hasta verileri için, en uygun kodlama tekniği ve öğrenme modelini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bulgular, bazı modellerin farklı kodlama teknikleri kullanılarak eğitildiğinde büyük veri setlerinde kötü performans gösterdiğini ve eğitim sürelerinin değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Lineer ayırım analizi modeli, sağlık verileri setinde ortalama eğitim süresi ile en iyi bir performans sergilemiştir. Ayrıca, etiket kodlama tekniğinin daha düşük boyutlu verilerle daha iyi performans göstermiştir. Bir diğer çalışmada, Florian Pargent vd. [11] kategorik değişkenleri sayısal temsillere dönüştürme yöntemlerini incelemişler ve bu yöntemlerin makine öğrenmesi algoritmalarının performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Büyük ölçekli bir karşılaştırmada, farklı kodlama stratejilerini beş makine öğrenimi algoritması (lasso, rastgele orman, gradyan artırma, KNN ve destek vektör makinesi) ile regresyon, ikili ve çoklu sınıflandırma görevleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, hedef kodlamanın, etiket kodlama ve one-hot kodlamaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ashima Sindhu Mohanty vd. [12] ise dengesiz dağılımlı Otizm Spektrum Bozukluğu veri setini kullanarak bir sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, veri setindeki kategorik özellikler frekans kodlama yöntemiyle sayısal değerlere dönüştürülmüş ve ardından sayısal özellikler z-skor metodu ile standartlaştırma ön işlemine tabi tutulmuştur. İkinci aşamada, veri seti boyutu temel bileşen analizi kullanılarak azaltılmıştır. Son olarak, iki aşamada farklı makine öğrenmesi modelleri ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. En yüksek sınıflandırma performansı %99 doğruluk ile destek vektör makinesi modeli ile elde edilmiştir. Yine benzer bir çalışmada, Shasha Zhang vd. [13]

koroner arter hastalığını erken aşamada doğru şekilde teşhis edebilecek bir makine öğrenmesi sistemi geliştirmişlerdir. Bu kapsamda hem XGBoost ve hem de rastgele orman algoritmalarını kullanarak sınıflandırma performanslarını karşılaştırmışlardır. Veri setindeki kategorik özellikleri sayısal değerlere dönüştürmek için frekans kodlama kullanılmıştır. Ayrıca, veri setini dengelemek için SMOTE ve ADASYN işlemleri uygulanmıştır. XGBoost algoritması, özellik oluşturma ve SMOTE ile işlenmiş veri setinde %94.7 doğruluk, değeri ile en iyi performansı göstermiştir. Ludmila B. S. Nascimento vd. [14] ise majör depresif bozukluk yaşayan çocuk ve ergenlerde depresyonla ilgili bir veri setinde, sırasız nominal kategorik özellikler için farklı kodlama yöntemlerini araştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçları, hash kodlama tekniği ile kodlanmış veri seti ile beslenen XGBoost modelinin daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan çalışmalar incelendiği zaman farklı kodlama tekniklerinin farklı model ve veri setlerinde farklı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada da farklı kodlama tekniklerinden hangisinin KNN algoritması üzerinde etkili sonuçlar verdiği analiz edilmektedir.

3 Problem tanımı

Bu çalışma, Dennis Wagner vd. [16] tarafından 2020 yılında oluşturulan, Sekonder Mantar Veri Seti'ni (Secondary Mushroom Dataset) [17] kullanmaktadır. Bu veri seti oluşturulurken, Jeff Schlimmer'in 1981'de katkıda bulunduğu ve 2016'da güncellediği Mantar Veri Seti'nden (Mushroom Dataset) [18] ilham alınmıştır. Veri seti, 23 farklı familyadan 173 farklı türden oluşan toplam 61.069 hipotetik mantarı içermektedir. Bu kapsamlı veri seti, mantarların yenilebilir veya zehirli olarak sınıflandırılması için tasarlanmıştır. Şekil 1 bir mantarın temel özelliklerini göstermektedir. Bu özellikler, bir mantarın zehirli ya da yenilebilir olarak sınıflandırılmasına yardımcı olur.



Şekil 1. Bir mantarın temel özellikleri

Veri seti oluşturulurken, mantarların yenilebilirliğini belirlemede kritik olan 20 farklı özellik sunulmuştur. Bu özelliklerden çok fazla kayıp değere sahip olan 5 özellik çıkarılmış ve hiçbir kayıp değer içermeyen 15 özellik kullanılmıştır. Bu özellikler arasında; şapka çapı, şapka şekli, şapka yüzeyi, şapka rengi, morarıp morarmadığı, lamel bağlantısı, lamel aralığı, lamel rengi, sap yüksekliği, sap genişliği, sap rengi, halka olup olmadığı, halka tipi, habitat ve mevsim bulunmaktadır. Her bir özellik, genel sınıflandırmaya katkıda bulunan spesifik karakteristikler sağlamaktadır. Veri setinde bulunan tüm özelliklerin kod, ad, tür ve aldığı olası değer bilgileri Tablo 1'de gösterilmiştir. Burada, F1'den F15'e kadar olan veriler özellikleri temsil ederken, C ise hedef değişkeni temsil etmektedir. Üç tane özellik (F1, F9 ve F10) sayısal değerler içerirken diğer özellikler ise kategorik veriler içermektedir. C hedef değişkeni ise e (yenilebilir) veya p (zehirli) olmak üzere iki değerden birini almaktadır. Bu durum veri setinin ikili sınıflandırmaya uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Tablo 2'de de veri setine ait birkaç örnek verilmiştir.

Tablo 1. Veri setinde bulunduran tüm özelliklerin bilgileri

Kod	Ad	Veri Türü	Değer
F1	şapka çapı	sayısal	Kayan noktalı sayılar (cm cinsinden)
F2	şapka şekli	kategorik	çan=b, konik=c, tümsek=x, düz=f, batık=s, küresel=p, diğerleri=o
F3	şapka yüzeyi	kategorik	lifli=i, oluklu=g, pullu=y, düz=s, parlak=h, deri=l, ipeksi=k, yapışkan=t, kırısk=w, etli=e
F4	şapka rengi	kategorik	kahverengi=n, sarımsı=b, gri=g, yeşil=r, pembe=p, mor=u, kırmızı=e, beyaz=w, sarı=y, mavi=l, turuncu=o, siyah=k
F5	morarıp morarmadığı	kategorik	morarıyor=t, morarmıyor=f
F6	lamel bağlantısı	kategorik	bitişik=a, serbest=x, inişli=d, serbest=e, sinüat=s, gözenekli=p, yok=f
F7	lamel aralığı	kategorik	yakın=c, uzak=d, yok=f
F8	lamel rengi	kategorik	kahverengi=n, sarımsı=b, gri=g, yeşil=r, pembe=p, mor=u, kırmızı=e, beyaz=w, sarı=y, mavi=l, turuncu=o, siyah=k, yok=f
F9	sap yüksekliği	sayısal	Kayan noktalı sayılar (cm cinsinden)
F10	sap genişliği	sayısal	Kayan noktalı sayılar (mm cinsinden)
F11	sap rengi	kategorik	kahverengi=n, sarımsı=b, gri=g, yeşil=r, pembe=p, mor=u, kırmızı=e, beyaz=w, sarı=y, mavi=l, turuncu=o, siyah=k, yok=f
F12	halka olup olmadığı	kategorik	halkalı=t, yok=f
F13	halka tipi	kategorik	örümcek ağı=c, geçici=e, genişleyen=r, oluklu=g, büyük=l, sarkık=p, kılıflı=s, zonlu=z, pullu=y, hareketli=m, yok=f
F14	habitat	kategorik	çimen=g, yaprak=l, çayır=m, patika=p, fundalık=h, kentsel=u, atık=w, orman=d
F15	mevsim	kategorik	ilkbahar=s, yaz=u, sonbahar=a, kış=w
C	sınıf	kategorik	yenilebilir=e, zehirli=p

Tablo 2. Veri setine ait birkaç örnek veri.

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	C
5.48	x	s	n	t	s	d	r	4.47	14.14	w	f	f	d	a	p
4.84	c	i	y	f	a	c	n	6.99	8.08	w	f	f	d	u	p
6.68	x	t	n	f	s	c	n	6.52	8.76	n	f	f	d	w	p
55.82	o	y	y	f	p	c	y	8.92	48.05	k	f	f	d	s	e
46.9	o	y	y	f	p	c	y	6.12	39.68	k	f	f	d	s	e
5.11	b	y	r	f	s	c	n	6.84	9.73	n	t	e	d	u	p
8.19	b	t	w	f	e	c	w	13.2	14.82	w	t	l	d	a	p
8.34	x	t	n	f	x	c	w	7.4	21.38	w	f	f	d	a	e
3.16	f	s	w	f	d	d	w	3.33	5.73	w	f	f	g	a	e
3.37	f	t	u	f	a	c	w	4.26	7.05	w	f	f	d	a	p

4 Metot

4.1 Kodlama teknikleri

Bu çalışmada, KNN sınıflandırma algoritması için veri setindeki kategorik özellikleri sayısal özelliklere dönüştürmek amacıyla çeşitli kodlama teknikleri uygulanmıştır. **Tablo 1**'de görüldüğü üzere, veri setindeki 15 özelliğin 12 tanesinin kategorik formattadır. Bu özelliklerin etkili bir şekilde dönüştürülmesi sınıflandırma modelin performansını artırmak için çok önemlidir. Bu çalışmada kullanılan kodlama yöntemleri olan aşağıdaki açıklanmıştır.

4.1.1 Etiket kodlama

Etiket kodlama, kategorik değerleri tamsayı değerlerine dönüştürür. Her bir benzersiz kategori değere, alfabetik sıralamaya dayalı olarak benzersiz bir tamsayı atanır [19]. Örneğin, bir özelliğin kategorileri 'kırmızı', 'mavi', 'yeşil' ise, etiket kodlama bunları sırasıyla 0, 1, 2 olarak dönüştürebilir. Bu yöntem basit ve etkilidir, bu nedenle hesaplama açısından ucuz ve uygulanması kolaydır. Ancak, en büyük dezavantajı kategorik değişkenlere sıralama eklemesidir, bu da orijinal kategorik özellikte var olmayan bir sıralama veya derecelendirme anlamına gelir. Bu durum, belirli makine öğrenimi algoritmalarının kodlanmış değerleri sayısal bir öneme sahipmiş gibi yorumlamasına neden olabilir.

4.1.2 One-Hot kodlama

One-hot kodlama, kategorik özellikleri bir dizi ikili özelliğe dönüştürür. Bir özelliğin her kategorisi, yeni bir ikili sütuna (0 veya 1) dönüştürülür [20]. Örneğin, bir özelliğin kategorileri 'kırmızı', 'mavi', 'yeşil' ise, one-hot kodlama üç yeni ikili özellik oluşturur. 'Kırmızı' [1, 0, 0], 'mavi' [0, 1, 0] ve 'yeşil' [0, 0, 1] olarak temsil edilir. Bu yöntem, etiket kodlamanın sıralama sorununu ortadan kaldırırsa da, özellikle birçok kategoriye sahip özellikler için boyutluluğun önemli ölçüde artmasına neden olabilir. Bu durum, özellikle bazı algoritmaların performansını olumsuz etkileyebilir. Ancak, kodlanmış özelliklerin özellik alanında eşit uzaklıkta olmasını sağlar, bu da KNN gibi mesafeye dayalı algoritmalar için faydalı olabilir.

4.1.3 Frekans kodlama

Frekans kodlama, her kategoriye veri setindeki görülme sıklığıyla değiştirir. Bu yöntem, kategorik özelliğin dağılımını yakalar, bu da verinin içsel yapısını temsil etmede yararlı olabilir. Örneğin, renk özelliğinin kategorileri 'kırmızı', 'mavi', 'yeşil' ve normalize edilmiş sıklıkları 0.5,

0.3, 0.2 ise, 'kırmızı' 0.5, 'mavi' 0.3 ve 'yeşil' 0.2 olarak kodlanır [21].

4.1.4 Hash kodlama

Hash kodlama, kategorileri sayısal değerlere dönüştürmek için bir hash fonksiyonu kullanır. Bu yöntem, boyutluluğu azaltarak hem hesaplama açısından verimlilik sağlar hem de önemliliğe sahip özelliklerinin iyi bir şekilde ele alınmasını sağlar. One-hot kodlamasında olduğu gibi her kategori için yeni bir ikili sütun oluşturmak yerine, hash kodlama bir hash fonksiyonu kullanarak kategorileri belirli sayıda uzunluğa eşler. Bu durum, yüksek boyutluluk riskini azaltır ancak farklı kategorilerin aynı değere eşlendiği çakışmalar oluşturabilir [22].

4.1.5 Hedef kodlama

Hedef kodlama, bir kategoriye o kategori için hedef değişkenin ortalaması ile değiştirir [23]. Bu yöntem, kategorik özellikler ile hedef değişken arasındaki ilişkiyi yakalar ve bu da modelin tahmin gücünü artırabilir. Örneğin, 'kırmızı' 0.7, 'mavi' 0.2 ve 'yeşil' 0.5 hedef ortalamasına karşılık geliyorsa, 'kırmızı' 0.7, 'mavi' 0.2 ve 'yeşil' 0.5 olarak kodlanır. Bu kodlama yöntemi doğrudan hedef bilgilerini içereceği için model performansını artırabilir, ancak küçük veri setlerinde aşırı uyuma (overfitting) yol açabilir. Aşırı uyumu azaltmak için düzenleme teknikleri ve çapraz doğrulama sıklıkla kullanılır.

4.2 K-En Yakın Komşu Algoritması (KNN: K-Nearest Neighbours)

K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması, sınıflandırma ve regresyon görevleri için kullanılan basit ama güçlü bir gözetimli makine öğrenimi algoritmasıdır [3]. Bu çalışmada, parametrik olmayan yapısı ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle sınıflandırma için KNN algoritması kullanılmıştır.

KNN, bir veri noktasını, k en yakın komşusunun çoğunluk sınıfına göre sınıflandırır. Başka bir ifadeyle, algoritma, en yakın örneklerden k örnek arar. Yeni örneğin hangi sınıfa düşeceğine karar verilir. Bu yeni örnek, k en yakın komşuda en çok oyu alan sınıfa ait olarak sınıflandırılır.

KNN algoritmasında veri noktalarında arasında uzaklığın hesaplanma biçimi, sınıflandırma performansını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Bu uzaklık, düz çizgi mesafesi (diğer adıyla Öklid mesafesi), Manhattan mesafesi ve Chebyshev mesafesi olmak üzere üç farklı şekilde hesaplanabilir. Düz çizgi mesafesi, genellikle en sık tercih

edilen mesafe ölçütüdür ve iki nokta arasındaki doğrusal mesafeyi hesaplar. Bunun yanı sıra, Manhattan mesafesi, dik açılarla hesaplanan mutlak farklara dayanır ve özellikle verilerin grid yapısına sahip olduğu durumlarda etkilidir. Chebyshev mesafesi ise iki nokta arasındaki en büyük mutlak farkı alarak mesafeyi hesaplar ve genellikle maksimum mesafe bazlı ölçümlerde tercih edilir. Bu çalışmada, düz çizgi mesafesinin tercih edilmesinin sebebi, verilerin doğrusal bir dağılım sergilemesi ve bu ölçümün doğrusal veri yapıları için daha etkili sonuçlar sağlamasıdır. [24]. Her test örneği $x_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ ile eğitim veri noktaları $e_i = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$ arasındaki düz çizgi mesafesi, Denklem (1) ile hesaplanabilir.

$$d(x, e) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - e_i)^2} \quad (1)$$

En yakın komşuları bulma işlemi için, mesafe metriği dikkate alınarak x ile en yakın k adet eğitim örneği belirlenir. Bu komşular $N_k(x)$ olarak adlandırılır.

k değerinin seçimi KNN modelinin performansı için çok önemlidir. Küçük bir k değeri, modelin gürültüye duyarlı olmasına neden olabilirken, büyük bir k değeri karar sınırını yumuşatabilir. Bu çalışmada, optimal k değeri grid arama yöntemi ile belirlenmiştir.

Grid arama, bir makine öğrenimi modelinin hiper parametrelerini optimize etmek için kullanılan sistematik bir arama yöntemidir. Bu yöntem, hiper parametrelerin her biri için önceden belirlenmiş bir dizi değer oluşturur ve tüm olası kombinasyonları deneyerek modelin performansı değerlendirilir. Bu yöntem, her kombinasyon için modeli eğitip bir değerlendirme üzerinden sonuçları karşılaştırır ve en iyi performans sağlayan parametre kombinasyonunu seçer. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar Bölüm 4'te paylaşılmıştır.

Son adım ise çoğunluk oylaması işlemi içerir. Yeni veri noktası x_i için sınıf etiketi $C(x_i)$, k adet en yakın komşusu arasında çoğunluk oylaması ile belirlenir. Bu işlem, Denklem (2) ile gerçekleştirilebilir.

$$C(x_i) = \underset{Y_k}{\operatorname{argmax}} \sum_{x_j \in N_k(x)} C(e_j, Y_k) \quad (2)$$

burada Y_k potansiyel sınıfı temsil ederken, C ise sınıf gösterge fonksiyonu olup, argümanın Y_k sınıfına ait olup olmadığını gösterir.

5 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, KNN modelinin sınıflandırma performansını ölçmek için doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve f1-skoru olmak üzere dört farklı metrik kullanılmıştır [25, 26].

Doğruluk, modelin doğru sınıflandırdığı örneklerin toplam örneklere oranını ifade eder. Genel performansı ölçer ve Denklem (3) ile hesaplanır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (3)$$

burada, TP (True Positive) doğru pozitifleri, TN (True Negative) doğru negatifleri, FP (False Positive) yanlış pozitifleri ve FN (False Negative) yanlış negatifleri temsil eder.

Kesinlik, modelin pozitif tahminlerinin doğruluğunu ölçer. Bir sınıflandırma modeli pozitif bir tahmin yaptığında, bu tahminin ne kadarının doğru olduğunu ifade eder. Yüksek kesinlik, modelin pozitif tahminlerinde az hata yaptığını gösterir ve Denklem (4) ile hesaplanır.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

Duyarlılık, modelin gerçek pozitif örnekleri doğru bir şekilde tanıma yeteneğini ölçer. Gerçek pozitiflerin ne kadarının doğru bir şekilde tahmin edildiğini ifade eder. Yüksek duyarlılık, modelin gerçek pozitifleri kaçırmadan doğru bir şekilde tahmin ettiğini gösterir ve Denklem (5) ile hesaplanır.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

F1-skoru, kesinlik ve duyarlılığı birleştirerek modelin genel performansını değerlendiren bir metriktir. Kesinlik ve duyarlılık arasındaki dengeyi sağlar ve dengesiz sınıf dağılımlarında özellikle faydalıdır. F1-skoru, Denklem (6) ile hesaplanır.

$$F1 - \text{Skoru} = 2 \cdot \frac{\text{Kesinlik} \cdot \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (6)$$

KNN modelinin performansını daha güvenilir ve genel bir şekilde değerlendirmek için 5 katlı çapraz doğrulama kullanılmıştır. 5 katlı çapraz doğrulama, veri setini beş eşit parçaya böler ve her bir parça sırasıyla test seti olarak kullanılır. Bu süreç beş kez tekrarlanır ve her bir katmanın sonuçları ortalamak nihai performans metriği elde edilir. Bu yöntem, modelin genelleme yeteneğini daha iyi değerlendirmeye yardımcı olur ve aşırı uyum (overfitting) riskini azaltır [27]. Ayrıca, test seti boyutu %20 olarak belirlenmiştir, bu da veri setinin %80'inin eğitim için, %20'sinin ise modelin performansını bağımsız olarak değerlendirmek için kullanıldığı anlamına gelir.

Bu çalışmada yapılan analizler, Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, 6 çekirdekli ve 3.10 GHz hızında çalışan Intel(R) Core(TM) i5-10500 işlemciye sahip bir bilgisayarda yürütülmüştür. Ayrıca, 16 GB RAM kapasitesi ve 64-bit Windows 11 Pro işletim sistemi ile çalışılmıştır. Bu donanım ve yazılım kombinasyonu, büyük veri kümelerinin işlenmesi ve algoritmaların etkin bir şekilde uygulanması için yeterli performansı sağlamıştır.

Tablo 3, KNN modelinin farklı k değerleri ve kodlama teknikleri kullanılarak elde edilen performans sonuçlarını

göstermektedir. Açıkça görüldüğü üzere, frekans kodlama k değerinin 1 olduğu durumda, 0.9994 kesinlik, 1.0 duyarlılık, 0.9997 f1-skoru ve 0.9997 doğruluk değerleri ile en yüksek performansı göstermiştir. En kötü performansı ise k değerinin 7 olduğu durumda, 0.9243 kesinlik, 0.9083 duyarlılık, 0.9162 f1-skoru ve 0.9079 doğruluk değerleri ile hedef kodlama göstermiştir. Ayrıca, etiket kodlama (0.9993 kesinlik, 0.9991 duyarlılık, 0.9992 f1-skoru ve 0.9991 doğruluk), frekans kodlama (0.9994 kesinlik, 1.0 duyarlılık, 0.9997 f1-skoru ve 0.9997 doğruluk değerleri ile) ve hedef kodlama (0.9269 kesinlik, 0.9178 duyarlılık, 0.9223 f1-skoru ve 0.9143 doğruluk değerleri ile) en iyi performanslarını k değerinin 1 olduğu durumda göstermişlerdir. One-hot kodlama (0.9993 kesinlik, 0.9997 duyarlılık, 0.9995 f1-skoru ve 0.9994 doğruluk değerleri ile) ve hash kodlama (0.9935 kesinlik, 0.9948 duyarlılık, 0.9942 f1-skoru ve 0.9935 doğruluk değerleri ile) ise en iyi performanslarını k değerinin 5 olduğu durumda elde etmişlerdir. Her bir kodlamanın en iyi performansları gösterdiği durumların karışıklık matrisleri (confusion matrix) Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 3, KNN modelinin farklı k değerlerine karşı kodlama çeşitlerinin doğruluklarının nasıl değiştiğini

göstermektedir. Ayrıca, kesikli çizgili alanın büyütülmüş halini de sunmaktadır. Bu bölüm, özellikle yüksek doğruluk oranlarının küçük değişimlerini daha net görmek için büyütülmüştür.

- Etiket kodlama, farklı k değerlerinde oldukça istikrarlı bir performans sergilemektedir. Doğruluk oranı neredeyse sabit kalarak 1.0’a çok yakın seyretmektedir.

- One-hot kodlama, düşük k değerlerinde yüksek doğruluk oranına sahip olup, k değeri arttıkça performansında hafif bir düşüş gözlemlenmektedir. Ancak doğruluk oranı genel olarak yüksek kalmaktadır.

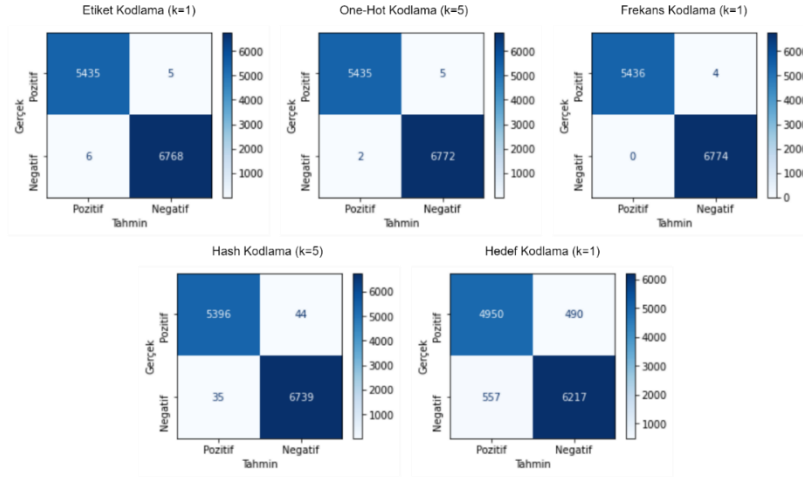
- Frekans kodlama da yüksek doğruluk oranına sahiptir ve k değerinin artmasıyla birlikte performansında çok hafif bir düşüş görülmektedir.

- Hash kodlama, diğer kodlama tekniklerine kıyasla daha düşük doğruluk oranına sahiptir ve k değeri arttıkça performansında belirgin bir düşüş yaşanmaktadır.

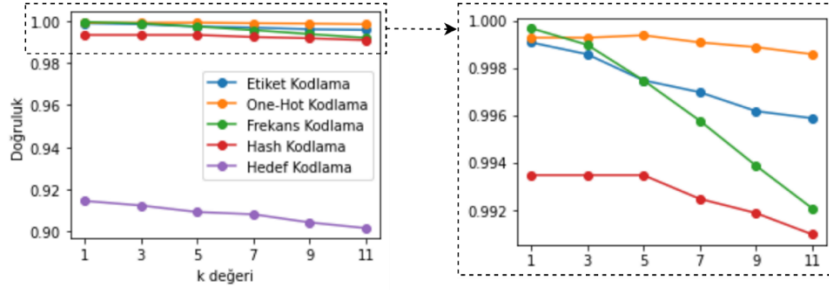
- Hedef kodlama, diğer tekniklere göre en düşük doğruluk oranına sahip olup, k değeri arttıkça performansında sürekli bir düşüş yaşamaktadır.

Tablo 3. KNN modelinin farklı k değerleri ve kodlama teknikleri için performans sonuçları.

k değeri	Kodlama Tekniği	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Skoru	Doğruluk
1	Etiket Kodlama	0.9993	0.9991	0.9992	0.9991
	One-Hot Kodlama	0.9993	0.9994	0.9993	0.9993
	Frekans Kodlama	0.9994	1.0	0.9997	0.9997
	Hash Kodlama	0.9926	0.9956	0.9941	0.9935
	Hedef Kodlama	0.9269	0.9178	0.9223	0.9143
	Etiket Kodlama	0.9987	0.9988	0.9987	0.9986
3	One-Hot Kodlama	0.9991	0.9996	0.9993	0.9993
	Frekans Kodlama	0.9982	1.0	0.9991	0.9990
	Hash Kodlama	0.9934	0.9948	0.9941	0.9935
	Hedef Kodlama	0.9246	0.9163	0.9204	0.9121
5	Etiket Kodlama	0.9979	0.9975	0.9977	0.9975
	One-Hot Kodlama	0.9993	0.9997	0.9995	0.9994
	Frekans Kodlama	0.9966	0.9990	0.9978	0.9975
	Hash Kodlama	0.9935	0.9948	0.9942	0.9935
	Hedef Kodlama	0.9227	0.9125	0.9175	0.9090
	Etiket Kodlama	0.9973	0.9972	0.9973	0.9970
7	One-Hot Kodlama	0.9988	0.9996	0.9992	0.9991
	Frekans Kodlama	0.9948	0.9976	0.9962	0.9958
	Hash Kodlama	0.9929	0.9937	0.9933	0.9925
	Hedef Kodlama	0.9243	0.9083	0.9162	0.9079
9	Etiket Kodlama	0.9970	0.9960	0.9965	0.9962
	One-Hot Kodlama	0.9982	0.9997	0.9990	0.9989
	Frekans Kodlama	0.9935	0.9954	0.9945	0.9939
	Hash Kodlama	0.9917	0.9937	0.9927	0.9919
	Hedef Kodlama	0.9197	0.9061	0.9128	0.9040
	Etiket Kodlama	0.9972	0.9954	0.9963	0.9959
11	One-Hot Kodlama	0.9981	0.9994	0.9987	0.9986
	Frekans Kodlama	0.9916	0.9941	0.9928	0.9921
	Hash Kodlama	0.9909	0.9929	0.9919	0.9910
	Hedef Kodlama	0.9177	0.9032	0.9103	0.9013



Şekil 2. Her bir kodlamanın en iyi performansları gösterdiği durumların karışıklık matrisleri



Şekil 3. Her bir kodlamanın KNN modelinin farklı k değerine karşı doğruluklarının değişimi

6 Sonuçlar

Bu çalışma, farklı kodlama tekniklerinin KNN algoritmasının mantarların sınıflandırma performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Bu sınıflandırma işlemi mantarların yenilebilir veya zehirli olduğunu tespit etmeye yaramaktadır. Sonuçlar, kodlama tekniklerinin model performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Özellikle frekans kodlama, düşük k değerlerinde en yüksek performansı sağlarken, hedef kodlama düşük performans sergilemiştir. Bu bulgular, araştırmacıların ve uygulayıcıların, veri setlerinin özelliklerine ve uygulama alanlarına bağlı olarak uygun kodlama tekniklerini seçmelerine yardımcı olabilir. Gelecekteki çalışmalarda, farklı veri setleri ve makine öğrenimi algoritmaları üzerinde benzer analizler yaparak, kodlama tekniklerinin geliştirilebilirliği daha da araştırılabilir. Ayrıca, öznel seçimi ve boyut azaltma işlemleri yapılarak modelin performansı artırılabilir. Ayrıca kullanılan modelin performansı ROC eğrisi ile desteklenebilir. Son olarak, bu çalışmanın bulguları, makine öğrenimi modellerinde kategorik veri dönüşümünün stratejik bir bileşen olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, veri bilimi topluluğu, kodlama teknikleri ve veri ön işleme yöntemleri üzerine daha fazla araştırma ve deney yaparak, bu alandaki bilgi birikimini ve uygulama pratiğini zenginleştirebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] C. Pan, A. Poddar, R. Mukherjee, and A.K. Ray, Impact of categorical and numerical features in ensemble machine learning frameworks for heart disease prediction. *Biomedical Signal Processing and Control*, 76, 103666, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103666>.
- [2] K.S. Sree, J. Karthik, C. Niharika, P.V.V.S. Srinivas, N. Ravinder, and C. Prasad, Optimized conversion of categorical and numerical features in machine learning models. In *2021 Fifth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, pp. 294-299, IEEE, November 2021. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC52330.2021.9640967>.
- [3] G. Guo, H. Wang, D. Bell, Y. Bi, and K. Greer, KNN model-based approach in classification. in *On The Move to Meaningful Internet Systems 2003: CoopIS, DOA, and ODBASE: OTM Confederated International Conferences, CoopIS, DOA, and ODBASE 2003, Catania, Sicily, Italy*, pp. 986-996, November 3-7, 2003.
- [4] H. Gupta and V. Asha, Impact of encoding of high cardinality categorical data to solve prediction

- problems. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 17, no. 9-10, pp. 4197-4201, 2020. <https://doi.org/10.1166/jctn.2020.9044>.
- [5] P. Yan, Anomaly Detection in Categorical Data with Interpretable Machine Learning: A random forest approach to classify imbalanced data. 2019.
- [6] K. Budholiya, S.K. Shrivastava, and V. Sharma, An optimized XGBoost based diagnostic system for effective prediction of heart disease. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 7, pp. 4514-4523, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.10.013>.
- [7] T. Al-Shehari and R.A. Alsowail, An insider data leakage detection using one-hot encoding, synthetic minority oversampling, and machine learning techniques. *Entropy*, vol. 23, no. 10, p. 1258, 2021. <https://doi.org/10.3390/e23101258>.
- [8] M. Hosni, Encoding Techniques for Handling Categorical Data in Machine Learning-Based Software Development Effort Estimation. in *KDIR*, pp. 460-467, 2023.
- [9] M.X. Low, T.T.V. Yap, W.K. Soo, H. Ng, V.T. Goh, J.J. Chin, and T.Y. Kuek, Comparison of label encoding and evidence counting for malware classification. *Journal of System and Management Sciences*, vol. 12, no. 6, pp. 17-30, 2022. <https://doi.org/10.33168/JSMS.2022.0602>.
- [10] S.K. Das and M.Z. Rahman, A Study on Machine Learning Algorithms with Different Encoding Techniques for Identifying the Right One for Patients' Big Data. *Jahangirnagar University Journal of Science*, vol. 43, no. 1, pp. 63-78, 2021.
- [11] F. Pargent, F. Pfisterer, J. Thomas, and B. Bischl, Regularized target encoding outperforms traditional methods in supervised machine learning with high cardinality features. *Computational Statistics*, vol. 37, no. 5, pp. 2671-2692, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00180-022-01207-6>.
- [12] A.S. Mohanty, K.C. Patra, and P. Parida, Toddler ASD Classification Using Machine Learning Techniques. *International Journal of Online & Biomedical Engineering*, vol. 17, no. 7, 2021. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i07.23497>.
- [13] S. Zhang, Y. Yuan, Z. Yao, X. Wang, and Z. Lei, Improvement of the performance of models for predicting coronary artery disease based on XGBoost algorithm and feature processing technology. *Electronics*, vol. 11, no. 3, p. 315, 2022. <https://doi.org/10.3390/electronics11030315>.
- [14] L.B. Nascimento, M. de Sousa Balbino, M.L. Teodoro, and C.N. Nobre, Assessment of the Relationship Between Attribute Coding and the Interpretability of Machine Learning Models: An Analysis in the Context of Children and Adolescents with Depression. In *BIOSTEC (2)*, pp. 482-489, 2024.
- [15] F. Pargent, B. Bischl, and J. Thomas, A benchmark experiment on how to encode categorical features in predictive modeling. München: Ludwig-Maximilians-Universität München, 2019.
- [16] D. Wagner, D. Heider, and G. Hattab, Mushroom data creation, curation, and simulation to support classification tasks. *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 8134, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87602-3>.
- [17] UCI Machine Learning Repository, Secondary Mushroom. <https://archive.ics.uci.edu/dataset/848/secondary+mushroom+dataset>, Accessed 25 June 2024.
- [18] UCI Machine Learning Repository, Mushroom. <https://archive.ics.uci.edu/dataset/73/mushroom>, Accessed 25 June 2024.
- [19] M.K. Dahouda and I. Joe, A deep-learned embedding technique for categorical features encoding. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114381-114391, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104357>.
- [20] C. Seger, An investigation of categorical variable encoding techniques in machine learning: binary versus one-hot and feature hashing. 2018.
- [21] C.T.T. Thuy, K.A. Tran, and C.N. Giap, Optimize the combination of categorical variable encoding and deep learning technique for the problem of prediction of Vietnamese student academic performance. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 11, 2020. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0111135>.
- [22] I. Lopez-Arevalo, E. Aldana-Bobadilla, A. Molina-Villegas, H. Galeana-Zapién, V. Muñoz-Sanchez, and S. Gausin-Valle, A memory-efficient encoding method for processing mixed-type data on machine learning. *Entropy*, vol. 22, no. 12, p. 1391, 2020. <https://doi.org/10.3390/e22121391>.
- [23] S. Mumtaz and M. Giese, Hierarchy-based semantic embeddings for single-valued & multi-valued categorical variables. *Journal of Intelligent Information Systems*, vol. 58, no. 3, pp. 613-640, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10844-021-00693-2>.
- [24] A. Almomany, W.R. Ayyad, and A. Jarrah, Optimized implementation of an improved KNN classification algorithm using Intel FPGA platform: Covid-19 case study. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 6, pp. 3815-3827, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.04.006>.
- [25] J. Lever, Classification evaluation: It is important to understand both what a classification metric expresses and what it hides. *Nature Methods*, vol. 13, no. 8, pp. 603-605, 2016.
- [26] Ž. Vujović, Classification model evaluation metrics. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, no. 6, pp. 599-606, 2021.
- [27] H. Jabbar and R.Z. Khan, Methods to avoid over-fitting and under-fitting in supervised machine learning (comparative study). *Computer Science, Communication and Instrumentation Devices*, vol. 70, no. 10.3850, pp. 978-981, 2015.





Grid interconnection solutions and power quality enhancement for a battery-supported hybrid PV system

Batarya destekli bir hibrit PV sistemi için şebeke bağlantı çözümleri ve güç kalitesinin iyileştirilmesi

Batuhan Güzey^{1,*} , Helin Bozkurt² , Ahmet Teke³ 

¹ Aselsan, Ankara, Türkiye

² Tarsus Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin, Türkiye

³ Çukurova Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Balcalı, Adana, Türkiye

Abstract

The energy demand is increasing unprecedentedly day by day due to the rapid development of technology. Clean and sustainable energy sources are used more intensively to meet environmental demands. This paper aims to design a grid-connected hybrid system consisting of a 12.45 kW Photovoltaic (PV) system and a 10 kWh capacity battery energy storage system (BESS). In the design procedure, Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (INC), Artificial Neural Network (ANN), and Hybrid Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms are implemented and tested. The most efficient method is selected to yield the maximum power output from the PV module under a variety of environmental conditions. Since the capacity of PV and BESS are different, it is determined that Total Harmonic Distortion (THD) of injected current is high during night mode. To solve this issue and enhance power quality, a double-mode LCL filter is developed. When a single-mode LCL filter is used, the THD value is obtained as 4.8%. In the two-mode LCL filter application, this value has been reduced to 3.2%. The overall efficiency is measured as 97.5% under low irradiation conditions for the system with ANN-MPPT.

Keywords: PV, Power quality improvement, ANN MPPT, Energy storage

1 Introduction

The energy demand is increasing rapidly due to the development of technology, population growth and migration of people to developed countries. To meet this increasing demand, different energy resources are used. The first one is called as conventional resource. It leads to air pollution threatening human health, global warming, melting of glaciers, releasing greenhouse gases, and etc. [1]. In order to cope with these situations, renewable energy sources (RES) offer more environmentally, friendly, reliable, healthy and sustainable energy production way. On a global scale, conventional energy sources are replaced by RES. Recently, technological developments and investments are getting enhanced in this field. Solar energy is very convenient compared with other sources owing to be sustainable,

Öz

Teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesine bağlı olarak enerji talebi günden güne artmaktadır. Çevresel talepleri karşılayabilmek için temiz ve sürdürülebilir enerji kaynakları daha yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu makalede, 12.45 kW Fotovoltaik (FV) sistem ve 10 kWh kapasiteli batarya enerji depolama sisteminden (BEDS) oluşan şebeke bağlantılı bir hibrit sistem tasarlanmıştır. Tasarım prosedüründe Değiştir&Gözle (D&G), Artan İletkenlik (A-İ), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Hibrit Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNİ) algoritmaları uygulanmış ve test edilmiştir. Uygulanan algoritmalar arasından değişen çevre koşulları altında FV modülden maksimum güç çıkışını sağlayacak yöntem seçilmiştir. FV ve BEDS'nin güçleri birbirinden farklı olduğu için, sistem gece modundayken Toplam Harmonik Bozulmasının (THB) arttığı tespit edilmiştir. Bu sorunu çözmek ve güç kalitesini arttırmak için iki modlu bir LCL filtresi uygulanmıştır. Tek modlu LCL filter kullanıldığında THD değeri %4.8 elde edilmiştir. İki modlu LCL filter uygulamasında bu değer %3.2'ye düşürülmüştür. Ayrıca YSA- MPPT çalıştırıldığında düşük ışınımında %97.5 sistem verimliliği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: FV, Güç kalitesinin iyileştirilmesi, YSA MGNİ, Enerji depolama.

cleaned and abundant [2]. Solar energy is the radiant energy released by the fusion process in the core of the sun. Solar energy can be directly converter into electrical energy with the help of PV panels. The generated voltage and current from the PV vary depending on the irradiance and temperature level. In order to reduce the payback time of the investment costs for PV systems, it is extremely important to keep PV power at maximum level. Various algorithms are used to track the operation point and keep the power at maximum level. These algorithms are called as MPPT methods [3]. MPPT method not only ensures the power maximization from the PV module but also increases the operating life of the PV system [4]. MPPT method basically generates a reference signal. The DC-DC converter is controlled by the Pulse Width Modulation (PWM) signal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bguzey@hotmail.com (B. Güzey)

Geliş / Recieved: 31.10.2024 Kabul / Accepted: 17.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1576914

coming from MPPT integrated controller. The generated control signal is sent to the power converter as a trigger.

This study aims to design a system that enables the transmission of power generated by a PV system to the grid and BESS based on irradiation and temperature levels. When the PV system is off, the system utilizes the BESS to maintain power continuity. BESS is designed to capture energy store for later utilization efficiently. It is crucial to the functioning of electricity. An efficient BESS is significant for enhancing battery performance [5]. In addition to these design objectives, it is aimed to design a single LCL filter that will operate in two separate modes for day and night mode to increase power quality by reducing harmonic distortion of injected current. This design is performed on the MATLAB/Simulink platform. Furthermore, the system should always keep the power produced by the PV panel at a maximum level against changing irradiance levels. It is aimed to use various MPPT algorithms and to determine the most effective one. The response of the system to changing conditions is observed, and a stable system structure is provided

After, this introduction section, in Section 2, the importance and global status of renewable energy, along with the methods for DC-DC converters and MPPT algorithms are presented. In Section 3, the design parameters of the circuit topologies that constitute the system are provided. In Section 4, the results and discussions section compares the outcomes of the applied MPPT methods. Finally, Section 5 presents the overall conclusions of the study.

2 Hybrid PV-BESS

In Turkey, energy consumption is rising year by year as shown in Figure 1. Resource utilization is also increasing to meet demand at same ratio. The value and importance of energy resources has increased considerably. Being independent and self-sufficient in the energy sector has become the goal of countries [6]. To meet this demand, RES have taken a crucial role [7]. RES involve solar energy, wind energy, geothermal energy and bioenergy. These resources provide sustainable, reliable, inexhaustible, clean and more technological energy production [8]. According to the EMBER report [9] as shown in Figure 2 solar energy has taken part of 4.5% among whole electricity generation methods in 2022.

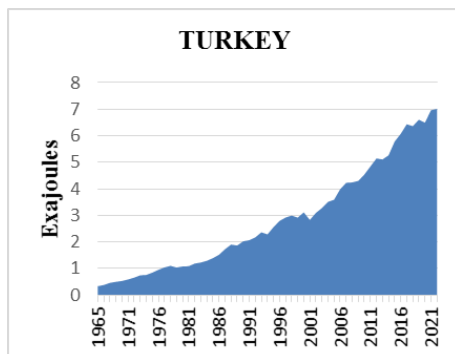


Figure 1. Energy consumption graph of Turkey

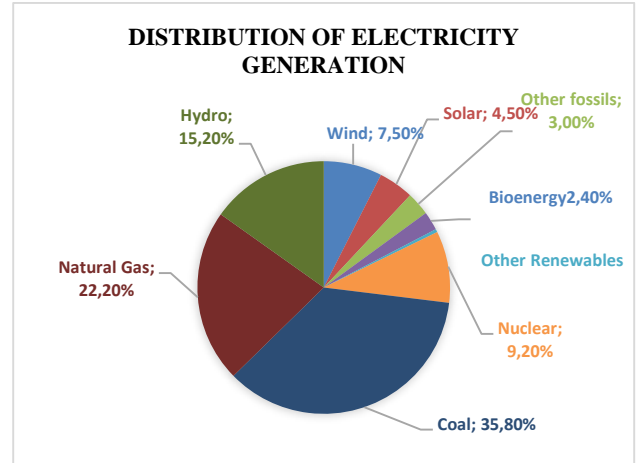


Figure 2. Methods of electricity generation in 2022

The irradiation levels of different places are also different. Utilizing solar energy quite descends the negative impact of carbon emissions. Moreover, this type of energy does not release detrimental gases that could devastate the environment. On the other hand, PV panels show that harvesting energy type from the sun is a non-polluting, reliable, and clean source of energy [10]. This source is used either directly or indirectly for various implementations that are not only restricted to industry processes but also feasible in other areas such as the drying of agricultural parts, battery electric vehicles, solar-powered refrigerators, water heating, and solar cooking. Cooking with solar energy can often be used in areas where there is plenty of radiation and no electricity [11]. The producing power from solar is only available in the daytime. If the uninterruptible power generation is required, battery assisted PV systems can be constructed. However, this hybrid systems ensure additional costs that raise the installation cost of the system [12]. PV module efficiencies are generally in the range of 14-22% depending on the quality of the production company. Together with technological developments, the ratio of efficiency is tried to be increased [13]. The temperature factor is also crucial in area selection. The efficiency of PV panels may decrease at high temperatures and this leads to a reduction in energy production [14].

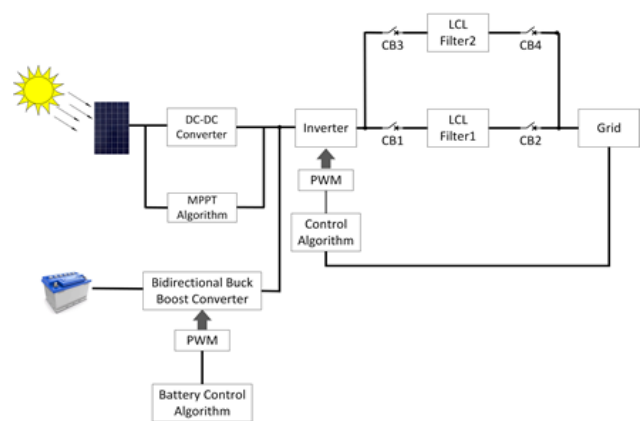


Figure 3. Proposed grid-connected hybrid PV&BESS system

The grid-connected hybrid PV & BES system involves PV modules, a DC-DC boost converter, an inverter, an LCL filter, a bidirectional buck-boost converter, and storage units. These are the main parts. DC-DC converters have significant tasks. Adjustment of voltage level and providing operation on maximum power are among these tasks. In many PV applications, the magnitude of voltage on the load side needs to be higher than the generated voltage from PV [15].

2.1 DC-DC converter topologies

A traditional boost converter is comprised of an inductor, a diode, a transistor, and an output capacitor being parallel to the load. The switching devices can be an IGBT or MOSFET [16] as shown in Figure 4.

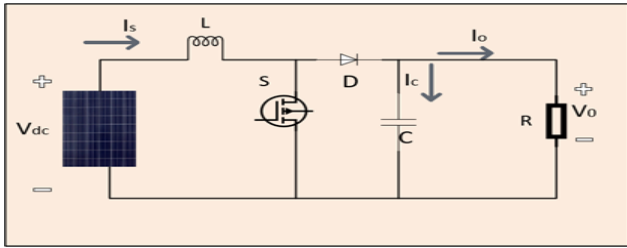


Figure 4. Circuit analogy of boost converter

Boost converter can be designed with the following formulas:

$$L = \left(\frac{V_{in}(V_0 - V_{in})}{\Delta I_L * f_s * V_0} \right) \quad (1)$$

$$\Delta I_L = \left(\frac{(0.1) * I_0 * V_0}{V_{in}} \right) \quad (2)$$

$$\text{Duty cycle} = \left(1 - \frac{V_{in}}{V_0} \right) \quad (3)$$

$$C = (I_0 * \text{Duty cycle}) / (f_s * V_{oc} * \Delta V_0) \quad (4)$$

$$R = \frac{V_0}{I_0} \quad (5)$$

Another type of converter is the bidirectional buck-boost converter as shown in Figure 5. It can be applied in various applications. As reversed to traditional unidirectional converters, power flows in two directions can be ensured. It can be also used for UPS, fuel cells, wind turbines, photovoltaic systems, plug-in hybrid electric vehicles (PHEV), battery electric vehicles (BEV), and smart grids [17, 18]. Bidirectional arrangements reduce the size of the circuit and increase the performance of the system. There is no need for two converters to adjust the flow of the current in forward and reverse direction. The entire process can be handled in a single circuit. Thus, bidirectional buck-boost converters ensure cost reduction and high reliability for charging batteries [19]. In this paper, a non-isolated bidirectional converter has been used and connected to the battery.

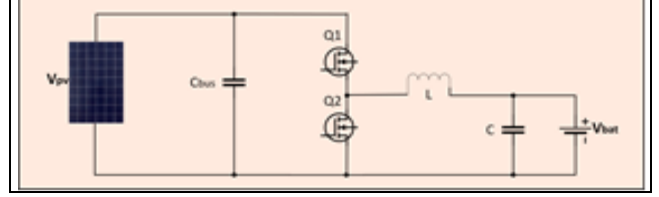


Figure 5. Circuit analogy of bidirectional converter

2.2 MPPT methods

In this paper, four different MPPT algorithms are performed. The P&O algorithm is the most common tracking method. The simplicity and low cost of the method make it one of the most preferred techniques. The conventional P&O algorithm has several drawbacks such as convergence speed, determination of accurate perturbation direction, and number of oscillations [20].

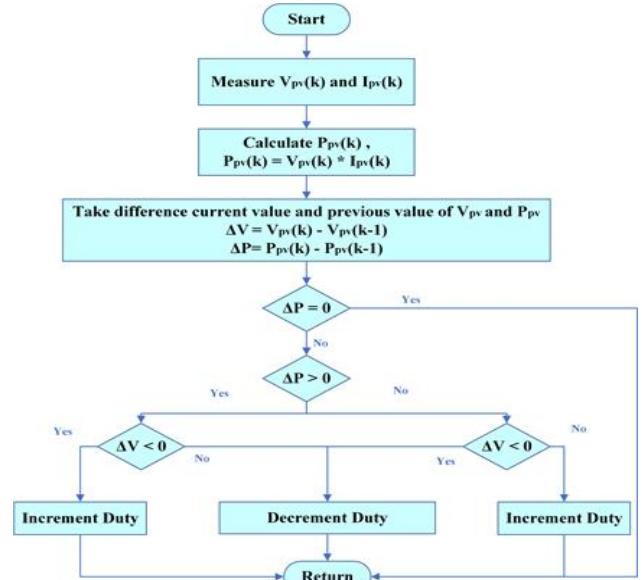


Figure 6. Flowchart of P&O algorithm

This topology adjusts the duty ratio by comparing the present value of the power and the previous value. It achieves this by applying a perturbation to the reference. The flowchart of the design is expressed in Figure 6. The topology ensures that the specific parameter stays around the maximum power point by repeatedly perturbing the operating point. If there is a momentary power drop due to changing weather conditions, the P&O algorithm perturbs the reference and adjust the power harvesting level upper position. The second method is called as INC which can eliminate the slow response and steady-state errors of the P&O algorithm. It is advantageous under fast-changing weather conditions due to the dynamic response. However, the INC is more complex and harder to implement than the P&O method. The INC method tracks MPP using the slope of the P-V curve. This procedure uses instantaneous conductance which is represented by I/V and incremental conductance which is symbolized by dI/dV for MPPT [21] and the flowchart is given in Figure 7.

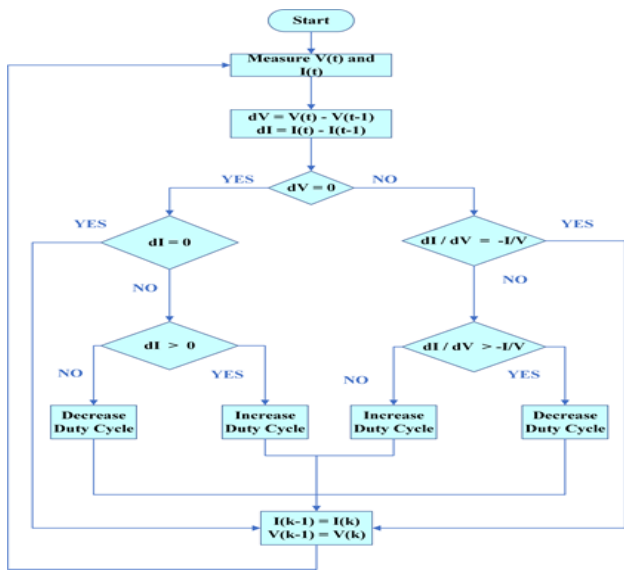


Figure 7. Flowchart of INC algorithm

The other method which is called as ANN-MPPT which is an intelligent way to keep the power at maximum level. The response of traditional algorithms is quite low in changing weather conditions. For this reason, traditional methods are replaced with intelligent algorithms. Designing a tracker using an ANN is one of the intelligent ways. ANN-based controllers have several capabilities like nonlinear mapping, robust operation, high-level efficiency, high-speed response [22].

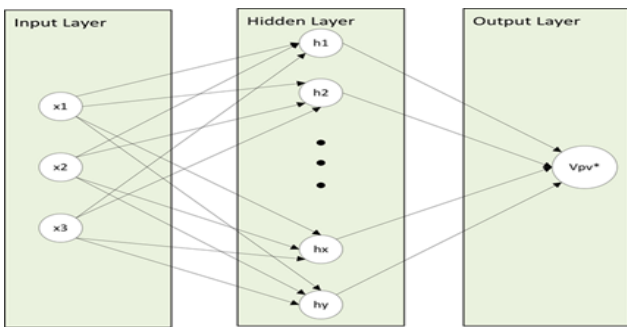


Figure 8. Flowchart of ANN algorithm

ANN controller has two inputs which are temperature and irradiance. The aim of the neural network is to arrange the duty ratio for the DC-DC converter. For changes in temperature or irradiation level, the system quickly sets the duty ratio again.

The last method is called as Hybrid-MPPT which is created from the best outputs of three separate methods at certain irradiance levels.

Another special part is the DC/AC inverter in the PV system. Inverters are key components that combine grid and PV circuit design. In a single-stage system, both MPPT and grid synchronization are performed by the inverter [23]. To acquire the best performance from the panel, choosing an appropriate grid-connected inverter is a critical topic [24]. In the design stage of the grid-connected inverters, filters are

used for producing pure sine waves. It should be placed between the inverter and the electric grid. The most effective filter to damp the current harmonics is the LCL filter [25]. It can be used at low switching frequencies. It has a lower voltage drop and higher absorption factor compared with conventional L and LC filters [26].

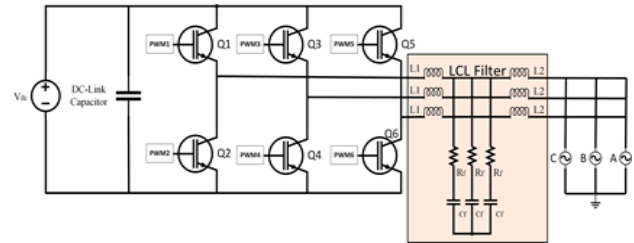


Figure 9. Grid-connected inverter with LCL filter

In grid-connected systems, the phase angle information of utility voltage is a crucial part of controlling inverters [27]. Phase information is used in the stage of power control. PLL algorithm acquires this information to synchronize utility and three-phase inverter. The main duty of PLL is to extract phase angles with the help of some specific operations [28]. The performance of the system directly depends on the quality of the PLL design. Besides taking phase information, PLL should provide low distortion output and suppress frequency variations. It includes negative feedback. Thus, the circuit structure becomes a closed loop. It consists of a phase detector, a voltage-controlled oscillator and a loop filter [29].

3 Design stage

Panel type and the number of cells differ according to the proposed power level to be produced. In this paper, 1Soltech-1STH-FRL-4H-260-M60 is used as a PV module. The parameters of the PV array are indicated below.

Table 1. Parameters of PV system

Power at STC (W)	260
Power at PTC (W)	231.4
Power Density at STC (W / m ²)	155.689
V _{mp} : Voltage at Max Power (V)	31.6
I _{mp} : Current at Max Power (A)	7.93
V _{oc} : Open Circuit Voltage (V)	38.6
I _{sc} : Short Circuit Current (A)	8.21
Open Circuit Voltage Temp Coefficient (%/°C)	-0.356
Short Circuit Current Temp Coefficient (%/°C)	0.07
Max Power Temp Coefficient (% / °C)	-0.453

PV array characteristics are given in Figure 10.

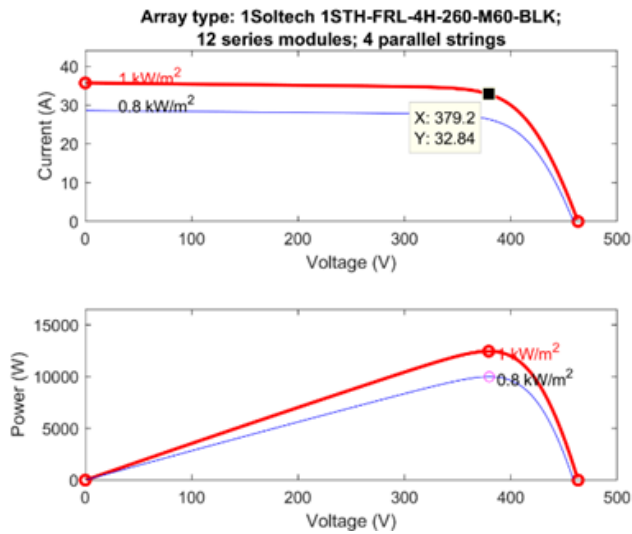


Figure 10. The I-V and P-V curves of the PV system

The generated power is transmitted to the boost converter to arrange the power level. The output voltage of the PV panel is about $380V_{dc}$. The system DC bus voltage is calculated as $700V$. It is necessary to use a boost converter to increase the voltage level. In addition, current and voltage fluctuations in circuits occur for many reasons. These are called as ripples and to improve system performance, ripple probability should be added to the parameter calculation. The voltage ripple percentage is taken at 1% and the current ripple percentage is taken at 10%. The parameter values of the boost converter are specified in Table 2.

Table 2. Boost converter design parameters

Input Voltage (V_{in})	380V
Output Voltage (V_{out})	700V
Duty Ratio (D)	0.4571
Switching Frequency (f_{sw})	20000Hz
Output Current (I_{out})	17.78A
Voltage Ripple (DV)	7
Current Ripple (DI)	1.78
Capacitor (C_{out})	58.076 μ F
Desired Input Current (i_i)	3.276A
Inductor (L)	2.6519mH
Load (R)	39.36 Ω

The parameters of DC-DC boost converter is shown in Figure 11. The PWM signal of the boost converter is produced with the help of MPPT algorithms. The efficiency and steady-state response of each algorithm is different.

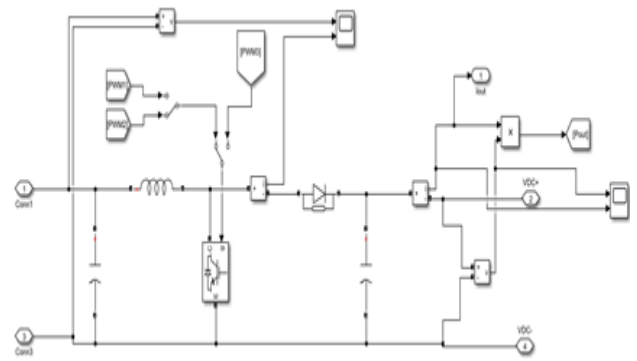


Figure 11. Simulation circuit of the boost converter

PWM1 signal is generated using the P&O MPPT method, PWM2 signal is generated using the INC method and PWM3 signal is generated using the ANN method. When these methods are compared, it is determined that different methods provide good reactions for different irradiation levels. For this reason, a hybrid method that combines the best ones in certain irradiances is designed and this system seems more efficient at low radiation levels as shown in Figure 12. After these systems, BESS is performed by combining some different stages. These stages are to build a DC-DC bidirectional buck-boost converter, battery and internal parameters, battery charging, and discharging controller.



Figure 12. Function block of hybrid MPPT

The battery is chosen lithium-ion type. Battery specifications are given in Table 3.

Table 3. Design parameters of battery

Type of battery	Lithium-Ion
Nominal voltage	420V
Rated capacity	24Ah
Cut off voltage	315V
Fully charged voltage	488.87V
Discharge Current	10.43A

The designed battery is tied to the DC bus with a bidirectional buck-boost converter that is used to decrease or increase voltage levels during the discharging and charging stages. The device has two sides which are called as high side and the low side. The DC bus voltage is taken at $700V$ as the high voltage side of the bidirectional converter. Battery voltage is chosen $455V$ as the low side of the converter. This procedure provides bidirectional current flow. The daytime

period is assumed to be 1 sec. and the nighttime period is assumed to be 1 sec. Since the PV panel generates power during the daytime, the battery performs the charging process. During nighttime, the battery is adjusted to the discharge mode automatically. The circuit diagram is shown in Figure 13 and bidirectional buck-boost converter parameters are stated in Table 4.

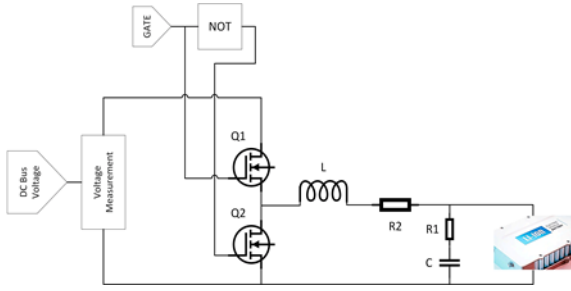


Figure 13. Block diagram of BESS

Table 4. Parameters of bidirectional converter

Capacitor (C)	1mF
First Resistor (R_1)	1 Ω
Inductor (L)	6mH
Second Resistor (R_2)	0.05 Ω
DC Bus Voltage (V_H)	700V
Battery Voltage (V_L)	455V
Switching Frequency	10kHz
Input Current Ripple	10%
Output Current Ripple	1%

In the charging state procedure, the difference between the battery voltage and the reference voltage is taken. This obtained value is given to the controller as an input signal. After that, the output of the controller is used to acquire the charging current as shown in Figure 14. The charging operation is assumed as 1 second (between 0 to 1) in the simulation part. The system operates for 1 second in daytime mode and switches to night mode. Another process is called as discharging mode, the difference is taken between the DC bus voltage and the reference voltage.

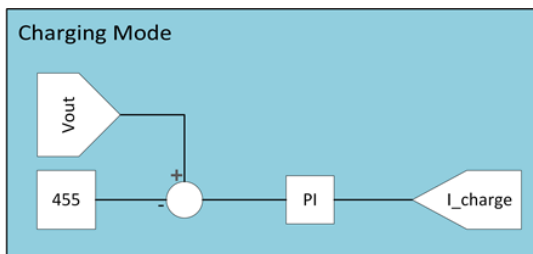


Figure 14. Charging controller of BESS

The six separate PWM signals are generated from the incoming signal and given to each switch mode transistor as a trigger signal. p-q control is performed as shown in Figure 15. Park and inverse park transformation is utilized for creating a robust p-q control structure. In addition, phase

information is also needed when applying the inverse park transformation which is represented by d-q to a-b-c block in Matlab/Simulink. The phase information component can be easily taken from the PLL circuit performed in the simulation. Since the battery and PV power are different, it is determined that the THD increased in a single LCL filter when switching from day mode and night mode. To prevent this situation, two robust filter modes have been designed according to two separate power levels. During the daytime, the first mode LCL filter works when the PV is in the active region. The second mode, LCL filter is in the off position. During the nighttime, when the PV is cut off region, the second mode LCL filter works.

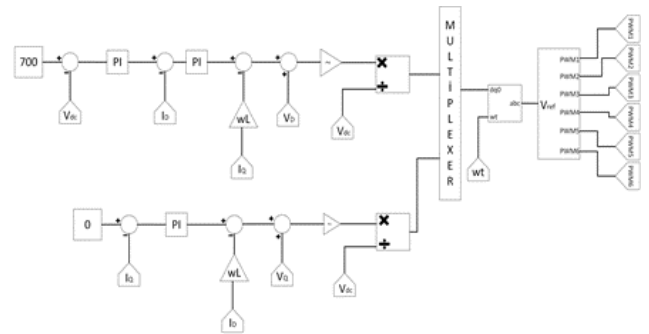


Figure 15. Power control of the three-phase inverter

In the first mode, LCL filter is in the off position as shown in Figure 16. The first mode LCL filter corresponds to daytime mode, and the second mode filter is represented to nighttime mode and THD is significantly reduced.

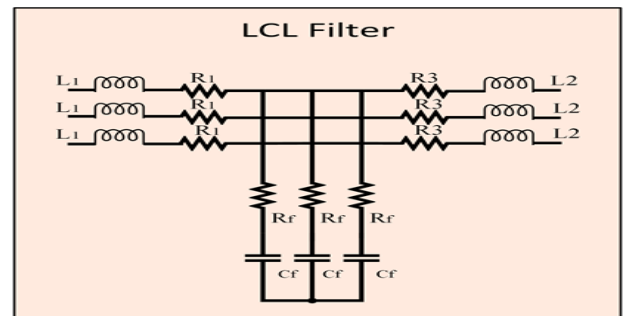


Figure 16. Representation of three-phase LCL filter

The parameter values of the first mode LCL filter, referred to as the daytime mode LCL filter, are presented in Table 5. When the PV system is off, the parameter values of the LCL filter are shown in Table 6.

Table 5. Daytime mode LCL filter

L_1 (Left Side Inductor)	2.5mH
R_1 (Left Side Resistor)	1m Ω
Capacitor	22 μ F
R_f (Bottom Side Resistor)	2 Ω
L_2 (Right Side Inductor)	100 μ H
R_3 (Right Side Resistor)	1m Ω

Table 6. Nighttime mode LCL filter

L_1 (Left Side Inductor)	2.1535mH
R_1 (Left Side Resistor)	1m Ω
Capacitor	18.76 μ F
R_f (Bottom Side Resistor)	0.6286 Ω
L_2 (Right Side Inductor)	68.85 μ H

The two-mode LCL filter, the cost reduction is obtained at 32% on the right-side inductor, 15% on the capacitor, 14% on the left-side inductor, and 31% on the right-side resistor.

4 Results of the research

In this section, outcomes of the P&O method at 1000 W/m² are indicated and the battery is operated for a total of 2 seconds, in daytime mode and nighttime mode. The SOC(%) percentage of the battery, the voltage of the battery, and the battery current value are indicated in Figure 17.

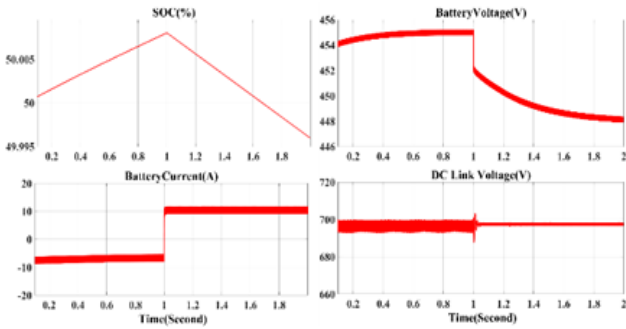


Figure 17. Battery outcomes with P&O at 1000 W/m²

At 1000 W/m² level, the efficiency is around 96% with the P&O method as shown in Figure 18 and Figure 19.

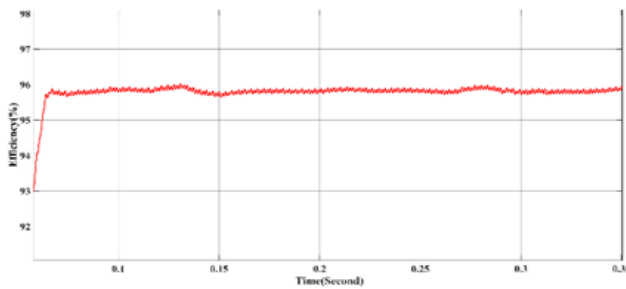


Figure 18. Efficiency of P&O method at 1000 W/m²

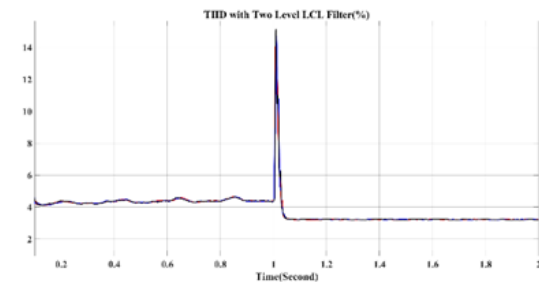


Figure 19. THD of two-mode LCL-P&O 1000 W/m²

The outcomes of the battery and DC bus voltage are stated in Figure 20 when INC tracking method is on.

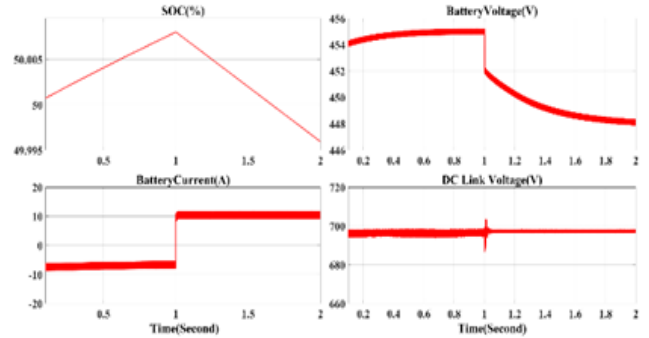


Figure 20. Battery outcomes with INC at 1000 W/m²

When the DC bus voltage of the INC method is compared with that of P&O, it is observed that there are fewer ripples in this method as shown in Figure 21. This shows that using the INC method, the pure DC signal form is approached. The efficiency of the INC algorithm is around 95.8%.

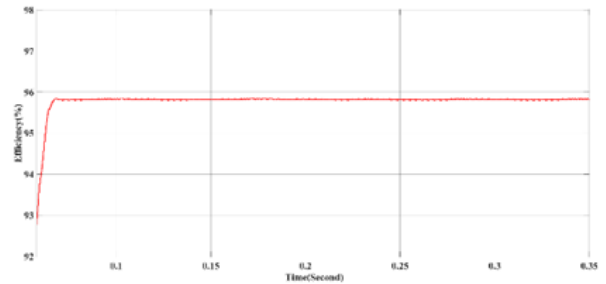


Figure 21. Efficiency of INC method at 1000 W/m²

Figure 22 shows the THD graph of the inverter output current. When the system is only in daytime mode, the distortion value decreased compared to P&O while the THD level of the P&O method is between the range of 4.2% - 4.5% in daytime mode. In the INC method, this value is in the range of 4.2% - 4.3%.

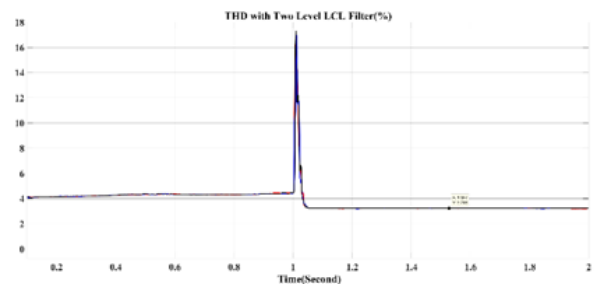


Figure 22. THD of two-mode LCL-INC 1000 W/m²

In this part, the ANN tracking method is used at 1000 W/m². If the DC bus voltage of the ANN method is analyzed as shown in Figure 23, it is observed that there are fewer ripples with using ANN compared to conventional algorithms. The efficiency of the system with ANN method is indicated in Figure 24.

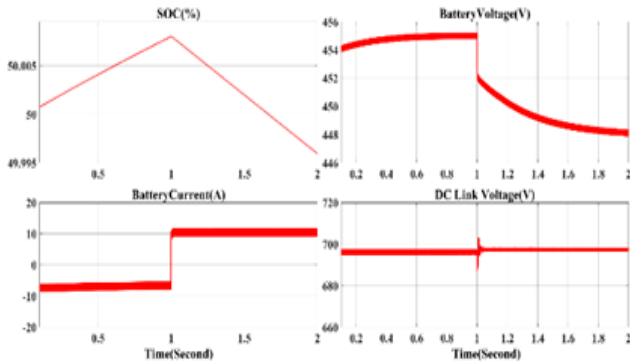


Figure 23. Battery outcomes with ANN at 1000 W/m²

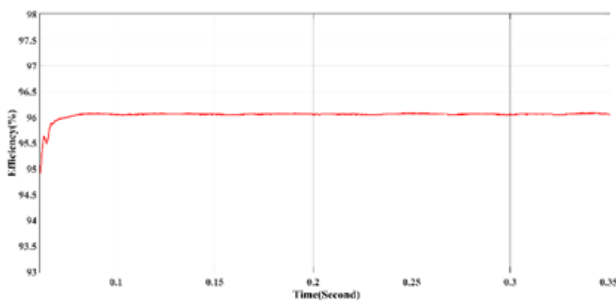


Figure 24. Efficiency of ANN method at 1000 W/m²

THD graph of the inverter output current is indicated as shown in In Figure 25. The THD level of the ANN method is between the range of 3.9%- 4% in daytime mode. If the second LCL filter structure is not applied in this circuit, the THD value of the current would have increased up to 5%.

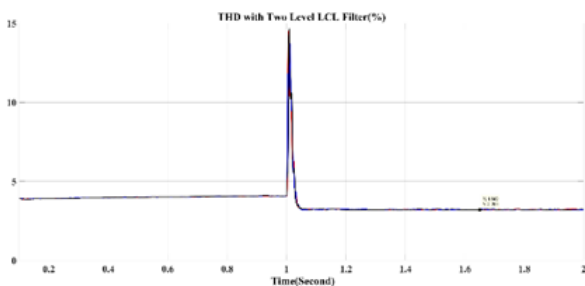


Figure 25. THD of two-mode LCL with ANN MPPT at 1000 W/m²

The ANN tracking algorithm is analyzed at 600 W/m². ANN method gives much smoother inverter output waveform than other methods. The battery and DC bus voltage results are expressed and the battery voltage, current and SOC values are similar to other irradiance levels. The ANN algorithm has a greater effect on DC voltage generation than traditional MPPT methods. The smoothest shape of the DC bus voltage has been acquired in this section by using the ANN based MPPT method at 600 W/m². The power efficiency of the system at 600 W/m², which is evaluated as low irradiance is also available in Figure 26. The power efficiency level is achieved around 97.5%. The ANN tracking method gives more efficient results and THD level at low irradiation as shown in Figure 27. The distortion value during daytime mode is between 2.95% - 3.05% which

is the best THD acquired in daytime mode as shown in Figure 28.

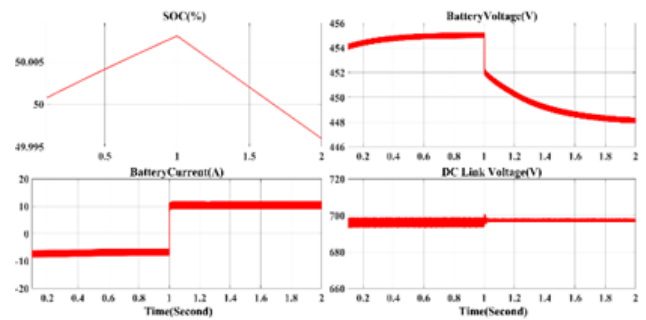


Figure 26. Battery outcomes with ANN at 600 W/m²

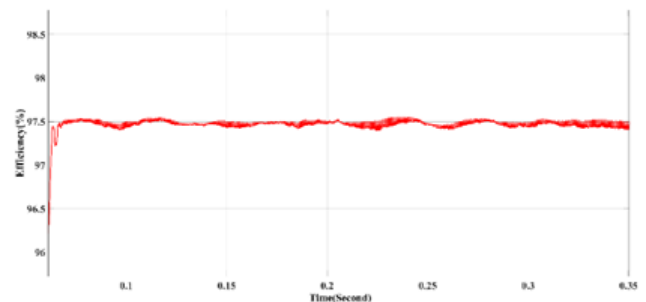


Figure 27. Efficiency of ANN method at 600 W/m²

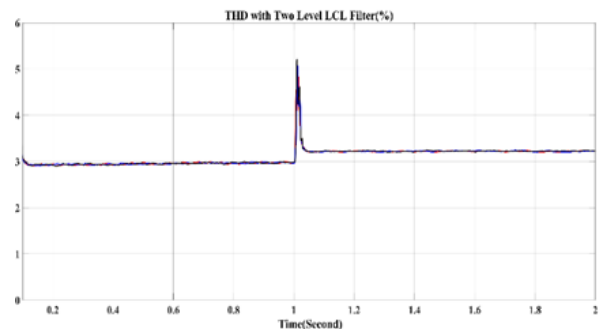


Figure 28. THD of two-mode LCL-ANN 600 W/m²

All the previous simulation results are evaluated and efficiency levels are studied. The percentage of efficiency offered by each method is different when the irradiance level changes. The obtained graph for specific irradiance is also available in Figure 29 and 30. The values alter from 1000 W/m² to 0 W/m² during the interval of 0-1 second. The irradiance parameter starts from 1000 W/m² and then it decreases to 800 W/m² at 0.2 seconds. After the change of selected MPPT during 0.2 to 0.4 seconds, the radiation level brings down from 800 W/m² to 600 W/m² at 0.4 seconds. Then, the efficiency percentage of an MPPT method is determined for 600 W/m² is between 0.4 to 0.6 seconds. When the simulation time is at 0.6 seconds, the irradiance level is reduced to 400 W/m². The selected MPPT for 400 W/m² is executed for 0.2 seconds. When the simulation time reaches 0.8s, the radiation level is decreased to 200 W/m².

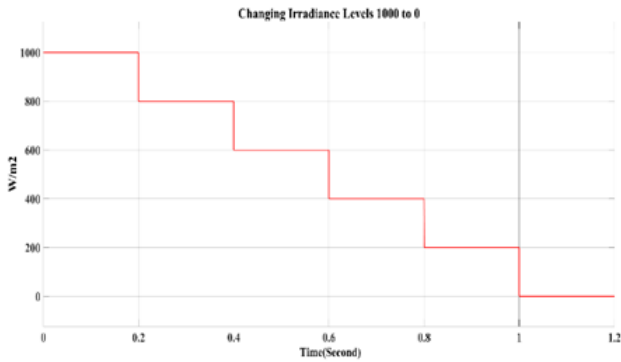


Figure 29. Irradiance level for hybrid-MPPT

PWM produced by P&O-MPPT is used at 1000 W/m². When the radiation level reaches 800 W/m², all algorithms are compared and it is observed that the most efficient method is INC. All the results for 600 W/m² are examined and the most efficient method becomes ANN- MPPT. For the 400 W/m², ANN gives the most efficient result. Finally, the 200 W/m² INC algorithm ensures the best outcome.

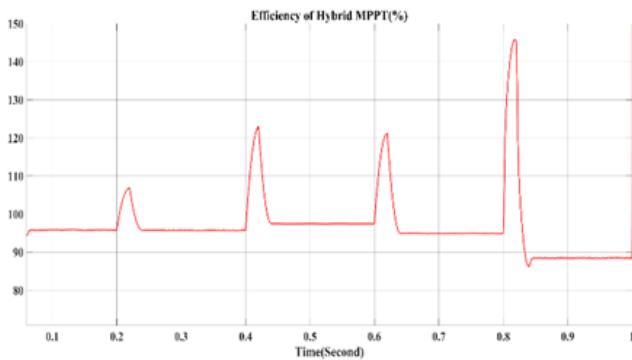


Figure 30. Efficiency result of hybrid mode MPPT

The efficiency and THD values are stated in Table 7.

Table 7. Summary of simulation results

General Simulation Outcomes of Paper						
Irr. (W/m ²)	P&O		INC		ANN	
	Thd (%)	Eff. (%)	Thd (%)	Eff. (%)	Thd. (%)	Eff. (%)
1000	4.03	95.8	4.11	95.8	3.9	96
800	3.42	95.5	3.51	95.7	3.3	97.6
600	2.95	95.2	3.08	95.2	2.9	97.4
400	3.01	93.5	2.76	93.7	2.5	94.9
200	2.54	87.4	2.42	88.5	2.3	86.7

5 Conclusions

The main objective of this paper is to determine the algorithm that keeps the energy obtained from sunlight at the maximum level in the most efficient way. The power generated by the PV panel is studied at three irradiance levels: 1000 W/m², 800 W/m², and 600 W/m². These irradiance levels are tested with three different MPPT methods, excluding the hybrid method. In the hybrid method, irradiance levels range from 1000 W/m² to 200 W/m². The system operates in daytime mode between 0-1 seconds. During this time, the PV feeds the battery and transfers

power to the grid. In the time interval of 1-2 seconds, the PV enters the cut-off region, and the battery switches to discharge mode to supply power to the system. The initially designed single-mode LCL filter resulted in high THD during the transition from daytime to nighttime, so efforts were focused on addressing this issue. The high THD is caused by the difference between the power produced by the PV and the power supplied by the battery. To overcome this problem, two-mode LCL filter that operates separately for daytime and nighttime is used. When the PV is active, the first mode filter operates, and the second mode filter is off. When the PV is inactive, the first filter turns off, and the second filter becomes active. A new improvement to the LCL filter contributes to a decrease in THD from 4.8% to 3.2%. The algorithm that provides the best results at low irradiance levels is the Hybrid MPPT method. In this tracking algorithm, PWM is generated with ANN at low irradiance levels. At high irradiance levels, conventional methods are used to generate PWM. Maximum efficiency of 97.5% - 97.7% is achieved using the ANN algorithm. In recent studies, the importance and implementation of hybrid energy solutions continue to increase day by day [30-34].

Conflict of interest

Authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 11 %

References

- [1] B. Guzey, Design and power quality improvement of a grid connected hybrid pv system. MsC Thesis, Cukurova University, Adana, Turkey, 2023.
- [2] T. T. E. Vo, H. Ko, J. Huh, and N. Park, Overview of solar energy for aquaculture: the potential and Future Trends. *Energies*, 14(21): 6923-6943, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14216923>
- [3] A. S. Eldessouky, I. M. Mahmoud, and T. S. Abdel-Salam, Mppt based on a novel load segmentations structure for pv applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(4): 101937-101949, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101937>
- [4] A. R. Reisi, M. H. Moradi, and S. Jamasb, Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19(1):433-443,2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.052>
- [5] S. Nyamathulla, C. Dhanamjayulu, A review of battery energy storage systems and advances battery management system for different applications: challenges and recommendations. *Journal of Energy Storage*, 86(1): 111179, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111179>
- [6] M. P. Randelovic, N. Kocic, and B. S. Randelovic, The importance of renewable energy sources for sustainable development. *Economics and Sustainable Development*, 4(2): 15-24, 2020. <http://dx.doi.org/10.5937/ESD2002016P>
- [7] Y. Yalman, Ö. Çelik, A. Tan, K. Ç. Bayindir, Ü. Çetinkaya, M. Yeşil, and B. Khan, Impacts of large-

- scale offshore wind power plants integration on Turkish power system. IEEE access, 10(1), 83265-83280, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3196779>
- [8] I. Hussein, Ö. Çelik, A. Teke, A hybrid random parameters modification to mppt algorithm to mitigate interharmonics from single-phase grid-connected PV systems. Energy Reports, 8, 6234-6244, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.062>
- [9] Ember, Global Electricity Review 2023. Clean energy policy and data, 762-769, 2023.
- [10] Ö. Çelik, K. Zor, A. Tan, A. Teke, A novel gene expression programming-based mppt technique for PV micro-inverter applications under fast-changing atmospheric conditions. Solar Energy, 239, 268-282, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.012>
- [11] S. K. Sansaniwal, V. Sharma, and J. Mathur, Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: a comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(1): 1576-1601, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.003>
- [12] Solar Energy Research. <https://understandssolar.com/advantagesvs-disadvantages-solar-power/> Accessed 05 October 2024
- [13] M. S. Abd-Elhady, M. M. Fouad, and T. Khalil, Improving the efficiency of photovoltaic (pv) panels by oil coating. Energy Conv. and Management, 115(1): 1-7, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.040>
- [14] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. El-Sherif, Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. Ain Shams Engineering Journal, 4(4): 869-877, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>
- [15] R. R. Gopi, and S. Sreejith, Converter topologies in photovoltaic applications – a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94(1):1-14, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.047>
- [16] M. F. Adnan, M. A. M. Oninda, M. M. Nishat, and N. Islam, Design and simulation of a dc-dc boost converter with pid controller for enhanced performance. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 6(9):1-6, 2017. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV6IS090029>
- [17] O. Onar, J. Kobayashi, D. C. Erb, and A. Khaligh, A bidirectional high-power-quality grid interface with a novel bidirectional noninverted buck-boost converter for phev. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61(5): 2018-2032, 2012. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2192459>
- [18] Z. Zhang, and K. T. Chau, Pulse-width-modulation-based electromagnetic interference mitigation of bidirectional grid-connected converters for electric vehicles. IEEE Transactions on Smart Grid, 8(6): 2803-2812, 2017. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2541163>
- [19] S. A. Gorji, H. G. Sahebi, M. Ektesabi, and A. B. Rad, Topologies and control schemes of bidirectional dc-dc power converters: an overview. IEEE Access, 7(1): 117997-118019, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937239>
- [20] L. Shang, H. Guo, and W. Zhu, An improved mppt control strategy based on incremental conductance algorithm. Protection and Control of Modern Power Systems, 5(14): 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1186/s41601-020-00161-z>
- [21] R. Alik, A. Jusoh, and T. Sutikno, A review on perturb and observe maximum power point tracking in photovoltaic system. TELEKOMNIKA, 13(3): 745-751, 2015. <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v13i3.1439>
- [22] Ö. Çelik, and A. Teke, A hybrid mppt method for grid connected photovoltaic systems under rapidly changing atmospheric conditions. Electric Power Systems Research, 152, 194-210, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.07.011>
- [23] J. Khan, and H. M. Arsalan, Solar power technologies for sustainable electricity generation – a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55(1): 414-425, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.135>
- [24] D. Kolantla, S. Mikkili, S. R. Pendem, and A. A. Desai, Critical review on various inverter topologies for pv system architectures. The Institution of Engineering of Technology Journals (IET) Renewable Power Generation, 14(17): 3418-3438, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0317>
- [25] N. Yu, J. Yang, S. Chen, and M. Ye, Design of lcl-filter based three-level active power filters. Indonesian Journal of Electrical Engineering, 12(1): 48-56, 2014. <http://dx.doi.org/10.11591/telkomnika.v12i1.3441>
- [26] M. Dursun, and M. K. Döşoğlu, Lcl filter design for grid connected three-phase inverter. 2018 Second International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 2018. <http://doi.org/10.1109/ISMSIT.2018.8567054>
- [27] V. Kaura, and V. Blasko, Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. IEEE Transactions on Industry Applications, 33(1): 58-63, 1997. <https://doi.org/10.1109/28.567077>
- [28] S. Golestan, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, 2017. Three-phase pll: a review of recent advances. IEEE Transactions on Power Electronics, 32(3): 1894-1907, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2565642>
- [29] S. R. Nandukar, M. Rajeev, Design and simulation of three phase inverter for grid connected photovoltaic systems. Proceedings of Third Biennial National Conference (NCTE), 2012.
- [30] L. Abdolmaleki, U. Berardi, Hybrid solar energy systems with hydrogen and electrical energy storage for a single house and a midrise apartment in North America, International Journal of Hydrogen Energy, 52(2): 1381-1394, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.222>
- [31] M. K. Khan, M. Raza, M. Shahbaz, U. Farooq, M. U. Akram, Recent advancement in energy storage technologies and their applications, Journal of Energy Storage, 92, 112112, 2024

- <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112112>
- [32] B. Li, Z. Liu, Y. Wu, P. Wang, R. Liu, L. Zhang, Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: challenges and opportunities, *Journal of Energy Storage*, 61, 106763, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106763>
- [33] A. Khazali, Y. Al-Wreikat, E. J. Fraser, S. M. Sharkh, A. J. Cruden, M. Naderi, M. J. Smith, D. Palmer, D. T. Gladwin, M. P. Foster, et al. Planning a hybrid battery energy storage system for supplying electric vehicle charging station microgrids. *Energies*, 2024; 17(15):3631. <https://doi.org/10.3390/en17153631>
- [34] W. Jan, A. D. Khan, and M. Z. Abbasi, A comprehensive review of hybrid photovoltaic-battery systems: Evaluating progress, identifying key issues, and exploring future prospects in sustainable energy integration. *Appl. Photovol. Tech.*, vol. 1, no. 1, Jan. 2024. <https://doi.org/10.59400/apt.v1i1.320>





Araç özel ağları tabanlı kaza bilgilendirme sistemi-KABİS

Accident information system based on vehicular ad hoc networks-KABIS

Muhammed Ali Beşli¹ , Muhammed Enes Bayrakdar^{2,*} 

^{1,2}Düzce Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce Türkiye

Öz

Günümüzde akıllı ulaşım sistemleri, araçtan araca (Vehicle-to-Vehicle, V2V) ve araçtan yol kenarına (Vehicle-to-Roadside, V2R) iletişim birimlerini kullanarak trafik sıkışıklığını azaltmanın yanı sıra emniyet ve güvenliği artırmayı hedeflemektedir. Türkiye İstatistik Kurumu'na (TÜİK) göre, sürücü kusurunun toplam kusurlara oranının %88'in altına düşmediği görülmektedir. Bu durum, sürücü hatalarının kronik bir sorun haline geldiğini ve üzerine detaylı çözüm önerilerinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, özellikle geçmişte çok sayıda kaza yaşanmış noktaların bilinmemesi, sürücülerin bu bölgelerde kaza riskini artıran dikkatsizlik davranışlarına yol açmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, sürücülere geçmişte kaza kara noktaları olarak tespit edilen bölgelere yaklaştıklarında önceden uyarıda bulunarak, bu bölgelerde dikkat seviyelerinin artırılmasını sağlamaktır. Son aşamada, yazılım testi ile çözümlenme, tasarım ve gerçekleştirim aşamalarının bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kaza, Araç Özel Ağlar, Trafik, Google Maps API, Firebase.

1 Giriş

Günümüzde karayolu trafiğinin büyük hacmi, trafik ortamının güvenliğini ve verimliliğini etkilemektedir. [1] Trafik sıkışıklığını azaltmak ve güvenliği sağlamak için doğru hava durumu açıklaması, yaklaşmakta olan tehlikelere karşı erken uyarı, trafiğin daha ayrıntılı algılanması ve diğer ilgili konular otomatikleştirilmiş bir ağ aracılığıyla sürücüler için oldukça yararlı olacaktır. [2] Otonom araç teknolojilerinin ilerlemesini hızlandıran en büyük motivasyonlardan biri, Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği tarafından tamamlanan istatistiksel bir araştırmaya göre şu an da kazaların yaklaşık %94'üne neden olan dikkat dağınıklığı, yorgunluk ve duygusal sürüş gibi insan kaynaklı hatalara karşı duyarsızlıktır. [3] Teknolojideki ilerlemeyle birlikte araçların çoğu araç içi kablosuz cihaz (OBU), GPS (küresel konumlandırma sistemi), EDR (olay veri kaydedici) ve sensörler (radar ve lidar) ile donatılarak araçlar arası iletişimi sağlayan VANET (Araç özel ağı) adı verilen özel bir araç ağı oluşturulmuştur. [4] VANET (Araç özel ağı), kazaları en aza indirmek amacıyla yol ve trafik koşullarına ilişkin bilgilerin güncellenmesi için araçların birbiriyle iletişimini sağlayan bir tür bilgi teknolojisidir. [2] Tüm bunlara rağmen on yıllardır sürücü kusurunun toplam kusura

Abstract

Today, smart transportation systems aim to reduce traffic congestion and increase safety and security by using vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-roadside (V2R) communication units. According to TÜİK, it is seen that the ratio of driver fault to total faults has not fallen below 88%. This situation reveals that driver errors have become a chronic problem and that detailed solution proposals should be developed. In this context, especially the lack of knowledge of points where many accidents have occurred in the past leads to careless behaviors of drivers that increase the risk of accidents in these areas. The main purpose of this study is to provide advance warning to drivers when they approach areas that have been identified as accident black spots in the past, and to increase their attention levels in these areas. In the last phase, an evaluation of the analysis, design and implementation phases was made with software testing.

Keywords: Accident, Vehicular Ad Hoc Networks, Traffic, Google Maps API, Firebase.

oranının %88'in altına hiç düşmemiş olması alınan tüm tedbirlerin, geliştirilen tüm teknolojilerin yetersiz olduğunun en büyük göstergesidir. Mevcut durumda sürücü kusurlarının trafik kazalarına dönüşmemesi amacıyla Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından geliştirilmiş sarsma bandı vb. çalışmalar mevcut olmakla beraber 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı [5] ve 12. Ulaştırma ve Haberleşme Şurası Sonuç Bildirisinde de [6] belirtildiği üzere dijitalleşme ve mobilite dinamiklerine uygun herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Önerilen sistem ile ele alınan sorun alanı 12. Ulaştırma ve Haberleşme Şurası Sonuç Bildirisinde [6] karayolu sektörü için bildirilen kısa vadeli hedefler arasında "Kaza kara noktası ve kaza potansiyeli yüksek noktaların iyileştirilmesi çalışmalarının sürdürülmesi." Maddesiyle yer almaktadır. Buna ek olarak 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planında [5] 4. Karayolları ve Karayolu Taşımacılığı başlığı altında "Trafik güvenliği yönetimi için büyük veriye dayalı bilgi ve karar destek sistemi geliştirilmesi işine başlanmıştır." İfadesine yer verilmiştir. Bu ve bunun gibi sistemler önerilen sisteme entegre edilerek sistemin avantajları ve stabilitesi artırılabilen, kapsamı genişletilebilmektedir. Bunlara ek olarak 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planında [5] 3.7 Teknoloji, İnovasyon ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr (M.E. Bayrakdar)

Geliş / Recieved: 10.06.2024 Kabul / Accepted: 23.12.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1497142

Dijitalleşme başlığı altında belirtilen “Ulaşım hizmetlerinin denetimini kolaylaştıracak ve etkin denetim yapılmasını sağlayacak dijital ulusal denetim sistemi altyapısı oluşturulmalıdır.” ifadesinde yer alan sistem uygulamaya entegre edilerek gerçekleşen kazaların bilgileri gerçek zamanlı olarak önerilen sisteme sağlanarak sürücülerin sadece geçmiş kazalar için değil anlık kazaların uyarısını da alması sağlanabilmektedir. Bu sayede mevcut bir kaza alanına yaklaşan aracın alana kontrolsüz girmesi engellenebilmektedir. Ülkemizde Nisan 2022’de yayınlanmış son veriye göre 32 milyon 321 bin 21 ehliyet sahibi bulunmaktadır. Her bir sürücü hayatında en az bir kez navigasyon kullanarak bilmediği bir yolda sürüş gerçekleştirdiği varsayıldığında önerilen sistem 32 milyonu aşkın doğrudan yararlanıcıya sahiptir. Aileler ile birlikte tahmini 120 milyonu aşkın dolaylı yararlanıcı olduğu düşünülmektedir.

Bölgelerdeki kaza sayısına göre tekrar sayısı belirlenen, 100 kaza kara noktasına ait veriler, gerçek zamanlı olarak veri tabanından çekilmektedir. Kullanıcı dostu ve 3 farklı dil desteği (Türkçe, İngilizce ve Almanca) bulunan KABİS uygulamamız aracılığı ile kullanıcıların ilgili kaza kara noktasına girerken, içerisinde gezinirken ve çıkarken uyarılması sağlanmaktadır.

2 Bilimsel yazın taraması

Kaza Bilgilendirme Sistemi (KABİS) uygulamasının oluşturulmasında ele alınan sorun alanı, yetersiz yol bilgisi durumunda sürücülerin hata yapma ve kazaya sebebiyet verme ihtimallerinin artmasıdır. Bu çalışmada sürücü kusurunun toplam kusura oranını düşürerek, trafik ortamının güvenliğini ve verimliliğini arttırmak amaçlanmaktadır. Bu amaçla literatür taraması 4 konu başlığı altında gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla yol güvenliği, Araç özel ağları (VANET), Otonom araçlar ve son olarak coğrafi sınır (Geofence) teknolojisi kullanılarak geliştirilen sistemler. İlk konu başlığı olan yol güvenliği konusunda literatür taraması yapıldığında gelecekle ilgili yapılan tahminlerin hiç de iyimser olmadığı görülmektedir. Örneğin: “Eğer acil önlemler alınmazsa, gelişmekte olan ülkelerde, gelecek on yıl içerisinde trafik kazaları sonucu yaklaşık altı milyon insanın öleceği ve altmış milyonun da yaralanacağı tahmin edilmektedir. [7] Yol güvenliği ile ilgili durum bu kadar kötüyken ikinci araştırma konusu olan Araç özel ağları (VANET) ile ilgili kapsamlı bir tarama sonucunda bu konunun oldukça sıcak bir araştırma konusu olduğu görülmektedir. [8] Hatta ülkemizin de geliştiricilerinden olduğu VANET’lerle ilgili dünya çapında popüler projelere rastlamak mümkündür. [7] Bu noktada gelecek vaat eden yapay zekâ aracı olarak makine öğreniminin araç ağında kullanılması ve zorlukları gibi iki sıcak araştırma konusunun birlikte değerlendirmesini de bulmak mümkün olmaktadır. [9] Fakat buna rağmen araç özel ağlarının güvenlik sorunlarından bahseden araştırmaların sayısı hiç de az değil. [4,8] Ek olarak VANET’lerde olduğu gibi otonom araçlarda da güvenlik sorunları ve savunma tekniklerinden bahseden birçok araştırma mevcuttur. [10,11] Bu noktada araç özel ağları ve otonom araçların güvenliği bu derece tartışma konusuyken sürücülerini tehlikelerden önce uyarmanın farklı

yöntemleri düşünülmüştür. En mantıklı uyarı aracının, bildirim şekli ve araçlara bağlanabilirlik bakımından oldukça kişiselleştirilebilir olması sebebiyle telefon olması gerektiğine karar verilmiştir. Bununla birlikte coğrafi sınır (Geofence) teknolojisini kullanarak geliştirilen sistemler araştırılmaya başlanmıştır. Geofence teknolojisi afet bilgi sistemlerinde sıklıkla tercih edilmiştir. [12,13] Yine aynı şekilde donanım ve yazılım bileşenlerini Geofence teknolojisi ile birlikte kullanarak araç çalınmasına karşı bir sistem de geliştirilmiştir. [14] Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda kaza sonrası tespit amaçlı birçok araştırma olmakla beraber, [15] potansiyel kaza noktaları öncesi uyarı vermek üzerine tasarlanmış 2 araştırmaya rastlanmıştır. [16,17] Tonec ve diğ. [16] araştırmalarında herhangi bir teknoloji ismi veya uygulama arayüzü belirtmeden, sadece geçmiş ve gerçek zamanlı verilerin birlikte kullanıldığı bir sistem önermektedir. Önerilen sistemin geliştirme süreci, veri kaynağı vb. noktalarda belirsizlikler mevcuttur. Yine geçmiş verilerin hangi yöntemlerle alınarak riskli bölge ilan edileceğine dair herhangi bir yöntem de belirtilmemiştir. Nayak vd. [17] ise ele alınan sorun alanı bakımından KABİS uygulaması ile aynı olmasına rağmen çözüm önerisi noktasında temelde 2 noktada KABİS uygulamamızdan farkı bulunmaktadır. Bunlardan ilki belirtilen araştırma sonucu önerilen uygulamanın KABİS’in aksine progressive web uygulaması olmasıdır. İkinci fark ise geçmiş kaza verileri kullanılarak 100’erli gruplama ve seçim yöntemlerindeki farklılıktır. Turna ve Aydın [18], yol güvenliği geliştirilmesinin değerlendirilmesine ilişkin yaklaşımlar sunmuşlardır. İlgili araştırmalara atıflarda bulunarak KABİS uygulamamız olan araştırma konumuzun gelişimi aktarılmıştır. Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda yukarıda bahsedilen benzerliklerin dışında KABİS uygulamasına rastlanmamıştır.

3 Materyal ve metod

KABİS uygulaması hayata geçirilirken izlenmesi gereken 4 aşama vardır. Bu aşamalar sırasıyla; Yazılım İsterleri Çözümlemesi (Software Requirements Analysis), yazılım tasarımı, yazılım gerçekleştirimi ve son olarak yazılım testi şeklindedir. İlk aşamada önerilen uygulamadan beklentiler belirlenerek gereksinimler açıklığa kavuşturulmuştur. Bu aşamada aynı zamanda yazılım isterleri modellenerek ve tanımlanarak sonraki aşamalar için temel oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise 4 adımda genel olarak yazılımın tasarımı gerçekleştirilerek, kullanılan veri setinin elde edilmesi ve hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar sırası ile veri tasarımı, mimari tasarım, yordamsal tasarım ve son olarak arayüz tasarımıdır. Uygulamada Google tarafından desteklenen Firebase Realtime Database kullanılmıştır. Bu sayede veri tabanında saklanan potansiyel kaza noktalarındaki herhangi bir değişiklik doğrudan uygulamada kullanılabilir hale gelmektedir. Sistemin yapılabiliğini göstermek amacıyla geliştirilen uygulamamızda, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Yönetim Merkezinden elde edilen veri seti [19] kullanılarak Python programlama dili ile konum bilgisi, kaza şekli, tekrar sayısı ve kapanan şerit sayısı gibi bilgilerden yararlanarak

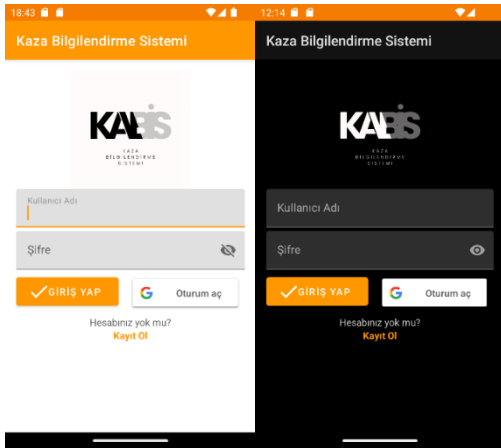
çeşitli yöntemlerle 100'erli gruplama ve her nokta için yarıçap (Radius) bilgisi elde edilerek veri tabanına aktarılmıştır. Türkiye'deki 81 il için geçmiş yıllara ait kaza bilgilerinin [20] elde edildiği durumda 81 il için ayrı ayrı potansiyel kaza noktalarına ait veriler veri tabanında tutularak uygulama girişi esnasında kullanıcı tarafından seçilen hizmet almak istenilen bölge bilgisine göre ilgili bölgeye ait veriler uygulama tarafından veri tabanından çekilmektedir. Üçüncü aşamada tasarım programlama diline dönüştürülmüştür. Önerilen uygulama Android Studio 2023.1.1 kullanılarak Java Programlama dili ile geliştirilmiştir. Uygulamaya gerekli harita desteği Google Maps API ile sağlanmaktadır. Son aşamada önceki aşamalar olan çözümleme, tasarım ve kodlama aşamalarının son bir değerlendirmesidir.

3.1 Kullanım alanları

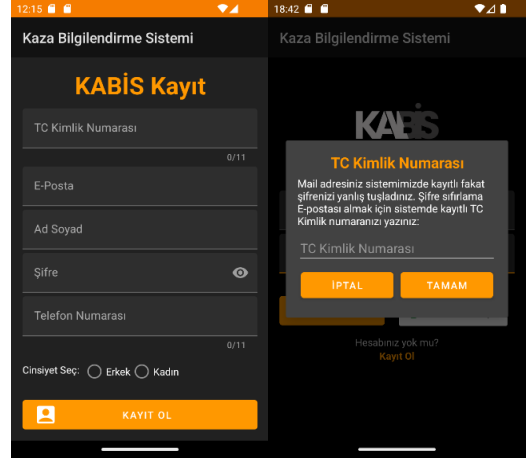
Kaza Bilgilendirme Sistemi (KABİS) elde ettiği çözümle beraber karayolu taşıtlarının sürücülerini hedeflemektedir. İlk versiyonu geçmiş yıllardaki kaza verilerini referans alacağından dolayı sürücülerin daha önce seyahat etmedikleri yollarda kullanabilecekleri bir uygulama olmaktadır. Fakat KABİS fikri itibarıyla geliştirmeye açık bir sistemdir. Bu kapsamda sisteme gerçek zamanlı kaza verileri sağlandığı durumda sistemin yararlanıcıları arasında 112 Ambulans şoförlerini, Tır şoförlerini, İtfaiye şoförlerini ve hatta Toplu taşıma şoförlerini dahil etmek mümkün hale gelecektir. Dolayısı ile sistemin kullanım alanları da artmaktadır.

3.2 Kimlik doğrulama

Kaza Bilgilendirme Sistemi (KABİS) uygulamamızda kimlik doğrulama işlemleri Firebase Authentication kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kullanıcılara Şekil 1'de de görüldüğü üzere kimliklerini doğrulamaları için e-posta-şifre ve Google hesabı olmak üzere iki seçenek sunulmaktadır. KABİS uygulamamızda kaydı bulunmayan kullanıcılarımız ana sayfada bulunan kayıt ol yazısına tıklamaları durumunda Şekil 2'de verilen KABİS Kayıt sayfasına yönlendirilmektedir. Burada e-posta, ad, soyad, şifre, TC Kimlik numarası, telefon numarası ve cinsiyet bilgilerini doğru şekilde girdikten sonra kullanıcının kaydı yapılarak tekrar ana sayfaya yönlendirilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 1. KABİS ana ekran



Şekil 2. KABİS kayıt ve şifre sıfırlama ekranı



Şekil 3. Kullanıcıların Firebase Realtime Database'de saklanması

Burada ve Ana Sayfada ilgili alanlara formatlara uygun olmayan girişler yapılamamaktadır. Örneğin şifre alanı en az 8 karakterden oluşan içerisinde en az 1 büyük harf, küçük harf, noktalama işareti ve sayı bulunduran bir string olmak zorundadır. Aksi durumda sistem tarafından kullanıcının kaydının yapılması engellenmektedir. Şifre bilgisi hariç olmak üzere kullanıcı bilgileri Şekil 3'te de gösterildiği üzere ek olarak Firebase Realtime Database üzerinde de saklanmaktadır. Kullanıcı Adı ve Şifre kullanarak giriş yapmak isteyen kullanıcılarımız sistemde kayıtlı bir e-posta ile giriş yapmaya çalıştığı halde sadece şifresini hatalı tuşlarsa Şekil 2'de gösterildiği gibi TC Kimlik numarasını yazması talep edilmektedir. Girilen TC Numarası sistemde kayıtlı TC Numarası ile eşleştiği takdirde sistemde kayıtlı e-postaya şifre sıfırlama e-postası gönderilmektedir.

3.3 Kaza kara noktaları 100'erli gruplama ve seçim

Kaza Bilgilendirme Sistemi (KABİS) geliştirilirken beyaz kutu yöntemi ile bileşenler tek tek test edilerek geliştirilmiştir. Bu yöntem, zaman kısıtı bulunan uygulamalarda herhangi bir hata durumunda en başa dönülme ihtimali olmadığı için tercih edilmiştir. Her test sonucunda tespit edilen hatalar hızlı ve basit bir şekilde düzeltilmiş, hatanın büyüyen ilerlemesinin önüne geçilmiştir. Bunun sonucunda düzgün ve hatasız çalıştığına kanaat getirilen bir birim artık tümleştirme testi için hazır hale gelmiş olmaktadır. KABİS uygulaması tümleştirme testi gerçekleştirilirken yukarıdan aşağı tümleştirme yöntemi kullanılarak kara kutu yöntemiyle test edilmiştir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Yönetim Merkezi tarafından paylaşılmış olan trafik duyuru veri setindeki [19] veriler içerisinde Python programlama dili kullanılarak KABİS uygulamamız için uygun veriler elde edilerek uygulamanın veri tabanı olan Firebase Realtime Database'e test verileri eklenmiştir. Python programlama dili ile veri setinde bulunan ve 3 kategoriden oluşan (yaralanmalı, can kaybı, zincirleme) kazanın şekli bilgisi ile kapanan şerit sayısı bilgisinden yararlanarak ayrı ayrı iki yarıçap (Radius) bilgisi elde edilmiştir.

Kazanın şekli bilgisine göre;

Zincirleme: mean = 750, std_dev = 100, min_radius = 500, max_radius = 1000

Can kaybı: mean = 400, std_dev = 50, min_radius = 300, max_radius = 500

Yaralanmalı: mean = 200, std_dev = 20, min_radius = 100, max_radius = 300

Değer ataması gerçekleştirilerek kapanan şerit sayısına göre hesaplanan yarıçap bilgisi Denklem (1)'de, kazanın şekline göre verilen ortalama ve standart sapma değerleri ile oluşturulan yarıçap bilgisi Denklem (2)'de, bu değerlerin float – int dönüşümleri Denklem (3)'te, kapanan şerit bilgisi kullanılarak elde edilen yarıçap bilgisinin %70'ini, kazanın şekli bilgisi kullanılarak elde edilen yarıçap bilgisinin %30'unu alan ve nihai yarıçap bilgisi Denklem (4)'te verilmektedir.

$$\begin{aligned} radius_from_CLOSED_LANE \\ = min_radius + (max_radius \\ - min_radius) \end{aligned} \quad (1)$$

$$* (CLOSED_LANE / 5)$$

$$\begin{aligned} radius_from_normal \\ = np.random.normal(mean, std_dev) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} radius_from_CLOSED_LANE_int \\ = int(radius_from_CLOSED_LANE) \\ radius_from_normal_int \\ = int(radius_from_normal) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} weighted_radius \\ = (0.7 * radius_from_CLOSED_LANE_int + 0.3 \\ * radius_from_normal_int) \end{aligned} \quad (4)$$

Denklem (1)'de radius_from_CLOSED_LANE kapanan şerit bilgisi ile elde edilen yarıçap bilgisini tutmaktadır.

min_radius ve max_radius kaza şekline göre atanmış minimum ve maximum yarıçap bilgisini tutmaktadır. CLOSED_LANE ise ilgili kaza için 0 ile 5 arasında kapanan şerit sayısı bilgisini tutmaktadır. Denklem (2)'de radius_from_normal kazanın şekline göre hesaplanan yarıçap bilgisini tutmaktadır. mean ve std_dev kaza şekline göre atanmış ortalama ve standart sapma değerlerini tutmaktadır. Denklem (4)'te weighted_radius %70 kapanan şerit bilgisi ile elde edilen yarıçap bilgisi %30 kazanın şekli bilgisi ile oluşan yarıçap bilgisi alınarak oluşturulmuş nihai yarıçap bilgisini tutmaktadır.

Aynı anda en fazla 100 coğrafi sınır (Geofence) oluşturulabildiğinden dolayı veri setinde bulunan bölgelerin tekrar oranlarını Denklem (5)'te gösterildiği şekilde hesaplayarak seçilecek olan 100 bölgenin içerisindeki tekrar sayısının yine bu orana göre belirlenmesi sağlanmıştır. Denklem (6) denklemlerinin çıktıkları Şekil 4'te ve Şekil 5'te gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} bolge_oranlari = bolge_sayisi \\ / toplam_olay_sayisi \end{aligned} \quad (5)$$

D100 15 Temmuz Şehitler Köprüsü Avrupa-Anadolu Yönü	0.024788
D100 Merter-Cevizlibağ Yönü	0.018917
D100 Halic (Orta Köprü) Okmeydanı	0.014351
D100 Okmeydanı-Halic Yönü	0.011089
0-3 Bayrampaşa-Vatan Yönü	0.010437
...	...
Edirnekapı-Halic Yönü	0.000652
Edirnekapı-Fatih Yönü	0.000652
Edirnekapı-10. Yıl Yönü	0.000652
10.Yıl Caddesi-Yedikule Yönü	0.000652
Yenikapı Şehit Vefa Karakurdu alt geçidi Bakarköy - Sırkeci Yönü	0.000652
Name: BOLGE, Length: 472, dtype: float64	

Şekil 4. Bölgelerin tekrar oranları

$$\begin{aligned} secilen_enlem_ve_boylam = veri.sample(n \\ = 100, weights \\ = veri['BOLGE'].map(bolge_oranlari)) \end{aligned} \quad (6)$$

	BOLGE	LATITUDE	LONGITUDE	\
99	Basın Ekspres Güneşli-İkitelli Yönü	41.022743	28.811795	
572	D100 İncirli(Yanyol)-Sirinevler Yönü	40.992654	28.854530	
225	D100 15 Temmuz Şehitler Köprüsü Avrupa-Anadolu...	41.049068	29.030532	
815	D100 Sefaköy-Cobançeşme Yönü	41.000446	28.804067	
1302	TEM GOP-Metris Yönü	41.091312	28.896575	
...
230	D100 15 Temmuz Şehitler Köprüsü Avrupa-Anadolu...	41.046533	29.033127	
540	D100 Haramidere-Ambarlı Yönü	41.000928	28.689315	
761	D100 Okmeydanı-Halic Yönü	41.053214	28.953877	
758	D100 Okmeydanı-Halic Yönü	41.051594	28.950391	
244	D100 15 Temmuz Şehitler Köprüsü Avrupa-Anadolu...	41.052466	29.027002	
	RADIUS	ACCIDENT_DESCRIPTION	CLOSED_LANE	
99	175.4	trafik kazası (yaralanmalı)	1	
572	611.4	trafik kazası (zincirleme)	1	
225	589.1	trafik kazası (zincirleme)	0	
815	127.9	trafik kazası (yaralanmalı)	0	
1302	190.5	trafik kazası (yaralanmalı)	2	
...
230	130.3	trafik kazası (yaralanmalı)	0	
540	148.7	trafik kazası (yaralanmalı)	1	
761	160.7	trafik kazası (yaralanmalı)	1	
758	190.2	trafik kazası (yaralanmalı)	2	
244	154.1	trafik kazası (yaralanmalı)	1	

[100 rows x 6 columns]

Şekil 5. Seçilen 100 noktaya ait enlem, boylam, yarıçap, kaza şekli ve kapanan şerit sayısı bilgisi

Denklem (5)'te bolge_oranlari her bir bölgenin tekrar sayısı kullanılarak hesaplanmış oranını tutmaktadır. bolge_sayisi ilgili bölgenin veri setindeki tekrar sayısını ifade etmektedir. toplam_olay_sayisi ise veri setindeki tüm

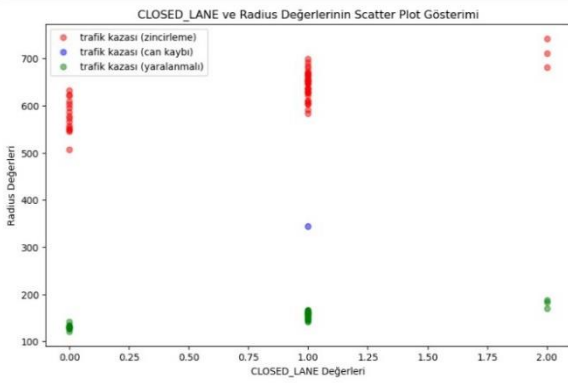
olayların sayısını yani 1533 değerini tutmaktadır. Denklem (6)'da secilen_enlem_ve_boylam oranlara göre her bölgenin tekrar sayısı belirlenmiş şekilde veri setinden 100 noktaya ait bilgileri tutmaktadır.

4 Bulgular ve tartışma

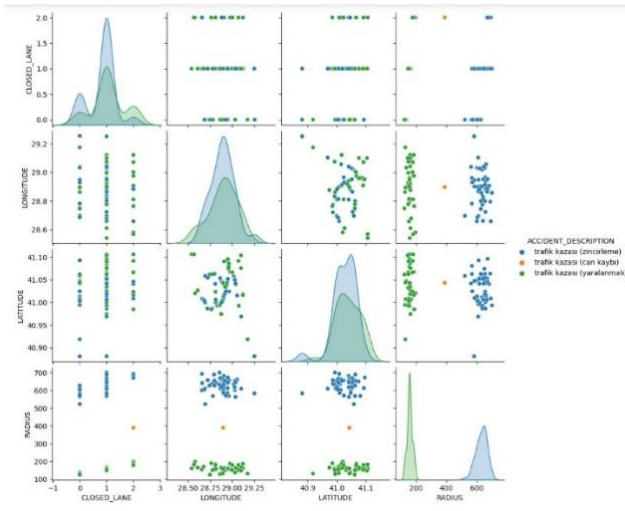
Şekil 6'da çeşitli veri bilimi yöntemleri uygulanarak uygulamamız için kullanılabilir hale getirilmiş veri setinden 5 kayıt verilmektedir. Şekil 7'de ise kapanan şerit sayısı ve kaza şekli bilgisinin yarıçap değerlerini nasıl etkilediğini gösteren grafik paylaşılmıştır.

ACCIDENT_DESCRIPTION	CLOSED_LANE	LONGITUDE	LATITUDE	BOLGE	RADIUS
287 trafik kazası (zincirleme)	1	29.029864	41.049718	D100 15 Temmuz Şehitler Köprüsü Avrupa-Anadolu	648.3
998 trafik kazası (can kaybı)	2	28.896882	41.043259	O-3 Sağmacılar Viyadüğü - Otogar Sapağı Yönü	389.9
1421 trafik kazası (zincirleme)	1	28.800458	41.062834	TEM Mahmutbey Geçeler-İkitelli Masko Yönü	628.2
723 trafik kazası (zincirleme)	1	28.882320	41.006621	D100 Merter-Cevizlibağ Yönü	658.2
725 trafik kazası (yaralanmalı)	1	28.886525	41.001850	D100 Merter-Cevizlibağ Yönü	158.3

Şekil 6. Veri setinden 5 kayıt



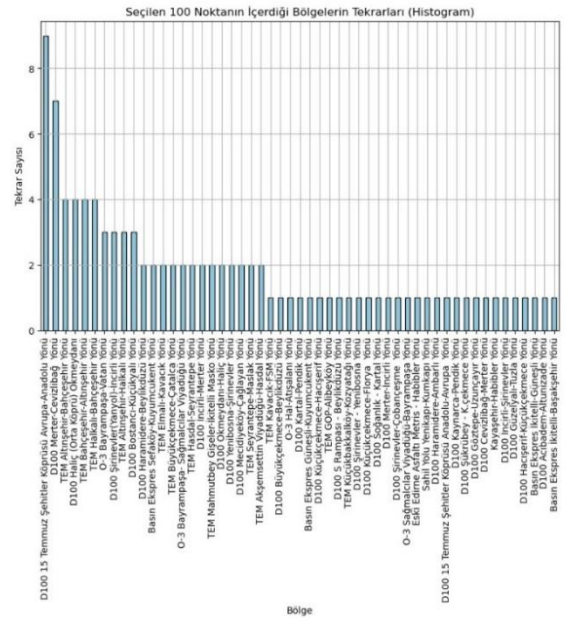
Şekil 7. Kapanan şerit sayısı ve kaza şekli ile yarıçap ilişkisi



Şekil 8. Enlem, boylam, kapanan şerit sayısı, kaza şekli ve yarıçap değerlerinin birbirleri ile olan ilişkisi

Şekil 8'de enlem, boylam, kapanan şerit sayısı, kaza şekli ve yarıçap bilgilerinin ilişkileri tek karede gösterilmektedir. Kazanın şekli ile kapanan şerit sayısının yarıçap bilgisi üzerindeki etkisi gözler önüne serilmektedir. Şekil 9'da ise

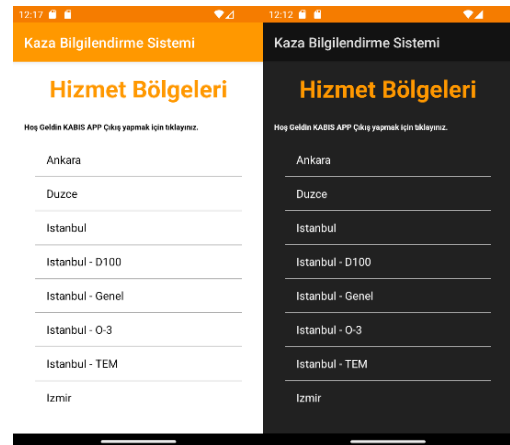
seçilen 100 noktanın içerdiği bölgelerin 100 nokta içerisindeki tekrar sayılarını gösteren grafik verilmektedir.



Şekil 9. Seçilen 100 noktanın içerdiği bölgelerin tekrar sayıları

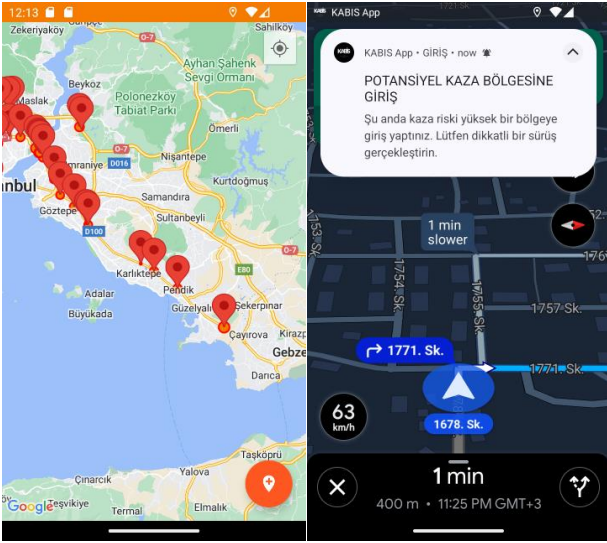


Şekil 10. Firebase Realtime Database kaza kara noktalarının saklanması



Şekil 11. KABİS hizmet bölgeleri ekranı

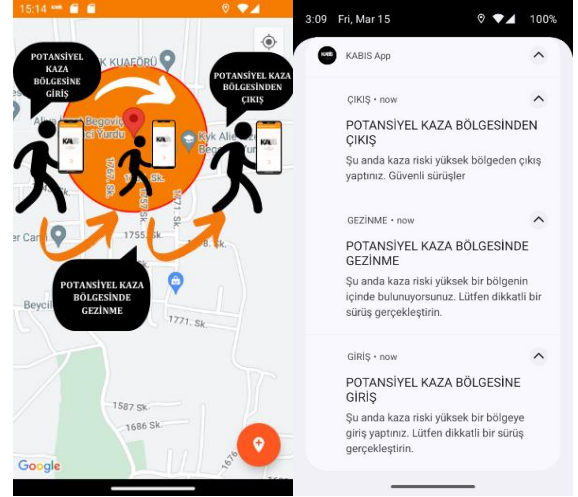
Şekil 10'da, veri setinden elde ettiğimiz 100 kaza kara noktasına ait bilgilerin Firebase Realtime Database'de nasıl saklandığı ve kullanıldığı gösterilmektedir. locations düğümü altında hizmet bölgesi isimleri tutulmaktadır. Her hizmet bölgesi içerisinde kaza kara noktaları saklanmaktadır. Her bir kaza kara noktası kendine özel enlem (latitude), boylam (longitude) ve yarıçap (Radius) bilgisi tutulmaktadır. KABİS uygulamamızda başarıyla oturum açan kullanıcılarımız Şekil 11'de gösterilen hizmet bölgeleri ekranına yönlendirilmektedir. Bu ekran Şekil 10'da gösterilen locations düğümü altında bulunan hizmet bölgelerini listelemektedir.



Şekil 12. KABİS haritalar ekranı ve Google haritalar yol tarifi ile kullanımı

Kullanıcı hizmet almak istediği bölgeye tıklama gerçekleştirdiği durumda ilgili bölgeye ait kaza kara noktalarının bilgileri veri tabanından çekilerek coğrafi sınırlar (Geofences) oluşturulmaktadır. Ardından Şekil 12'de gösterildiği üzere KABİS uygulamamız kapatılarak Google Haritalar uygulaması üzerinden yol tarifi ile bilmediğimiz bir güzergahta seyahat ederken seçilen hizmet bölgesine ait kaza kara noktalarından herhangi birisine giriş yaptığımızda, içerisinde gezinirken ve çıkış yapıldığında uygulamamız üzerinden bildirim gönderilmektedir.

Kullanıcı hizmet bölgesi ekranından hizmet almak istediği bölgeyi seçtiği takdirde seçilen bölgeye ait kaza kara noktalarına göre coğrafi sınırlar (Geofence) oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu coğrafi sınırlar hem KABİS uygulaması ile hem de Google Haritalar uygulaması ile çalışmaktadır. Şekil 13'te de gösterildiği üzere kullanıcı oluşturulan coğrafi sınırlardan herhangi birisine giriş yaptığında, bölgede gezindiğinde ve çıkış yaptığında uygulama tarafından bildirim gönderilmektedir. Coğrafi sınırın genişliği ilgili noktanın hesaplanmış yarıçap bilgisinin metre cinsinden ifade edilmesi şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 13. Coğrafi sınır eylemi ve KABİS bildirimler

5 Tartışma

Yapılan çalışmada, daha önce tecrübe etmediği bir yolda navigasyon yardımıyla seyahat eden bir şoförün, ilgili güzergahta kaza riski yüksek noktalara yaklaşırken uyarılarak daha fazla dikkat edilmesi sağlanmaktadır. Bildirim sesi, araçlara bağlanabilirlik vb. birçok yönden kişiselleştirilebilir telefonların bu uyarı için en uygun araç olduğu gözler önüne serilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda Geofence teknolojisi ile ilgili daha çok doğal afet ve hırsızlık üzerine çalışmalara rastlanmıştır. Kaza riski yüksek noktaların önerilen şekilde seçilerek 100'erli gruplandırıldığı kaza bilgi sistemi üzerine çalışmalara rastlanmamıştır.

6 Sonuçlar

Bu makale çalışması kapsamında geliştirilen sistem ile sürücü kusuru sebebiyle meydana gelen kazaların en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Sürücülerin hata yapma ihtimalini arttıran etmenlerin başında daha önce tecrübe etmedikleri, navigasyon yardımı ile ilerledikleri yollar gelmektedir. Tam bu noktada daha önce tecrübe etmediği bir yolda seyahat eden bir şoförün ilgili güzergahta daha önce çok sayıda kaza gerçekleşmiş olan kaza kara noktasına yaklaşırken uyarılması gerekmektedir. Belirtilen kaza kara noktaları seçilirken ilgili bölgede daha önce gerçekleşmiş kaza sayısına göre oranlanmaktadır. Ardından 100 noktanın içinde tekrar sayısı bu orana göre belirlenecek şekilde 100'erli gruplara ayrılmaktadır. Noktalara, ilgili noktada daha önce gerçekleşen kazanın şekli ve kapanan şerit sayısı bilgilerini kullanarak çeşitli hesaplamalar sonucu elde edilen yarıçap (Radius) bilgisi eklenmektedir. Bu sayede uyarı bildirimini ilgili noktanın şartlarına göre özel olarak gönderilmektedir.

Gelecek çalışmalarda sürücü kusurunun toplam kusura oranını düşürmeye yönelik çalışmaların yapılması trafik ortamının güvenliğini ve verimliliğini arttırmaya katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Veri setini paylaştıklarından dolayı İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Yönetim Merkezine teşekkür ederiz.

Karayolu trafik kazası istatistiklerini paylaştıklarından dolayı Türkiye İstatistik Kurumuna teşekkür ederiz.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili anneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] Raw, R. S., Kumar, M., & Singh, N. (2013). Security challenges, issues and their solutions for VANET. *International journal of network security & its applications*, 5(5), 95.
- [2] Vaibhav, A., Shukla, D., Das, S., Sahana, S., Johri, P. (2017). Security challenges, authentication, application and trust models for vehicular ad hoc network- a survey. *IJ. Wireless and Microwave Technologies*, 3, 36-48. doi: <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2017.03.04>
- [3] Van, B. J., O'brien, M., Gruyer, D., Najjaran, H. (2018). Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 89. ISSN 0968-090X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.012>.
- [4] Hasrouny, H., Samhat, A. E., Bassil, C., Laouiti, A. (2017). VANet security challenges and solutions: A survey. *Vehicular Communications*, Volume 7. ISSN 2214-2096. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2017.01.002>.
- [5] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı (2022). Erişim adresi: <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/2053-ulasirma-ve-lojistik-ana-plani-rev.pdf>.
- [6] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı 12. Ulaştırma ve Haberleşme Şûrası Sonuç Bildirisi (2021). Erişim adresi: <https://sgb.uab.gov.tr/uploads/pages/suralar/12-ulasirma-ve-haberlesme-surasi-sonuc-bildirisi.pdf>.
- [7] Tanwar, S., Vora, J., Tyagi, S., Kumar, N., Obaidat, MS. (2018). A systematic review on security issues in vehicular ad hoc network. *Security and Privacy*, 1:e39. doi: <https://doi.org/10.1002/spy2.39>
- [8] Liang, W., Li, Z., Zhang, H., Wang, S., Bie, R. (2015). Vehicular ad hoc networks: architectures, research issues, methodologies, challenges, and trends. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(8). doi: <https://doi.org/10.1155/2015/745303>
- [9] Tang, F., Mao, B., Kato, N., Gui, G. (2021). Comprehensive survey on machine learning in vehicular network: Technology, applications and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(3). doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3089688>
- [10] Cui, J., Liew, L. S., Sabaliauskaite, G., Zhou, F. (2019). A review on safety failures, security attacks, and available countermeasures for autonomous vehicles. *Ad Hoc Networks*, Volume 90, 101823. ISSN 1570-8705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.12.006>.
- [11] Pham, M., Xiong, K. (2021). A survey on security attacks and defense techniques for connected and autonomous vehicles. *Computers & Security*, Volume 109. ISSN 0167-4048. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102269>.
- [12] Deshpande, A., Shingte, A., Dwivedi, A., Sonawane, S. (2019). Geofencing for disaster management system. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(5).
- [13] Suyama, A., Inoue, U. (2016). Using geofencing for a disaster information system. In 2016 IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS). doi: <https://doi.org/10.1109/ICIS.2016.7550849>
- [14] Abbas, A. H., Habelalmateen, M. I., Jurdi, S., Audah, L., Alduais, N.A.M. (2019). November. GPS based location monitoring system with geo-fencing capabilities. In AIP Conference Proceedings, Vol. 2173, No. 1. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5133929>
- [15] Faiz, A. B., Imteaj, A., Chowdhury, M. (2015). November. Smart vehicle accident detection and alarming system using a smartphone. In 2015 international conference on computer and information engineering (ICCIE). doi: <https://doi.org/10.1109/CCIE.2015.7399319>
- [16] Tonec Vrančić, M., Škorput, P. and Vidović, K. (2023). An advanced driver information system at critical points in the multimodal traffic network. *sustainability*, 16(1). doi: <https://doi.org/10.3390/su16010372>
- [17] Nayak, B., Mugali, P. S., Rao, B. R., Sindhava, S., Disha, D. N., & Swarnalatha, K. S. (2019). Geofencing-based accident-avoidance notification for road safety. In *Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications: ERCICA 2018*, Volume 2. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6001-5_30
- [18] Turna, R. U., Aydın, C. (2010). Yol güvenliği geliştirilmesinin değerlendirilmesine ilişkin yaklaşımlar. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 12(1), 97-106.
- [19] İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Yönetim Merkezi (UYM) Trafik Duyuruları Veriseti (2020). Erişim adresi: <https://data.ibb.gov.tr/dataset/ulasim-yonetim-merkezi-trafik-duyuru-verisi>.
- [20] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, (2022) Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2022-49513#>.





Computational and experimental investigation of water surface around bridge piers

Köprü ayakları etrafındaki su yüzeyinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi

Mesut Çelik^{1,*}, Mücella İlkentapar^{2*}, Serhat Akşit³, Ahmet Alper Öner⁴

^{1,2,4} Erciyes University, Civil Engineering Department, 380039, Kayseri, Türkiye

³ Abdullah Gül University, Civill Engineering Department, 380039, Kayseri, Türkiye

Abstract

Free surface flow around bridge piers is one of the most important problems of open channel hydraulics. The structural design of the bridge should be done correctly along with the hydraulic design by simulating the water surface around the bridge piers together with the scour that will occur around the bridge piers. If the hydraulic design of the bridge piers is not good enough, it can cause very serious damages in situations such as floods and overflows. The aim of this paper is to analyze the effect of bridge piers on the water surface experimentally and numerically. For the numerical analysis, FLOW-3D, a computational fluid dynamics package program that performs 3-dimensional solution, and HEC-RAS package program are used and the results are compared. In the study, flows with the same velocity for different number of bridge openings were studied and compared with the experimental results. In addition, the FLOW 3D package program, which performs solutions with the finite volume method, was compared with the experimental results by performing solutions with different mesh sizes. As a result, it was observed that the solutions performed with the FLOW-3D package program showed very close results with the experimental data.

Keywords: Open channel hydraulic, Bridge piers, Water surface, FLOW-3D

1 Introduction

With the progress of civilization, the development of transportation networks has come to a very important point from past to the present and has become a very important part of human life, especially after the industrial revolution. One of the most important cornerstones of these transportation networks is the bridges built over rivers and open channels. Over time, the need to cross wider spans led to the necessity of placing bridge piers in the middle of rivers or open channels. Bridge piers can cause significant changes in water flow, leading to floods. Floods, which we consider as natural disasters, can have devastating effects in our country and around the world. During the flood, the water in the river overflows from its own bed, damaging the surrounding farmlands, roads, living points, etc. Flood can cause significant damage to people's social life, and it can also cause direct death and injury. Accurate determination of

Özet

Köprü ayakları etrafındaki serbest yüzeyli akım, açık kanal hidroliğinin en önemli problemlerinden biridir. Köprü'nün yapısal tasarımı, köprü ayakları etrafında oluşacak oyulma ve köprü ayakları etrafındaki su hareketini simüle eden hidrolik tasarım ile birlikte doğru bir şekilde yapılmalıdır. Köprü ayaklarının hidrolik tasarımı yeterince iyi değilse, sel ve taşkın gibi durumlarda çok ciddi hasarlara neden olabilir. Bu çalışmanın amacı köprü ayaklarının su yüzeyine etkisini deneysel ve sayısal olarak analiz etmektir. Sayısal analiz için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile 3 boyutlu çözüm yapan FLOW-3D paket programı ile HEC-RAS paket programı kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada farklı köprü açıklık sayıları için aynı hızda akışlar incelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca sonlu hacimler yöntemi ile çözüm yapan FLOW 3D paket programında farklı mesh boyutları ile çözüm yapılarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak FLOW-3D paket programı ile gerçekleştirilen çözümlerin deneysel veriler ile oldukça yakın sonuçlar gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık kanal hidroliği, Köprü ayakları, Su yüzü profilleri, FLOW-3D

the water surface profiles during flooding is extremely important in terms of minimizing the damages that may occur.

Bridges should have a good hydraulic design together with a good structural design. Hydraulic engineers have to consider the problems posed by the structures located on open channels. Therefore, a good bridge hydraulic design should include the analysis of the relationship between water surface profiles and flow rates in order to foresee the effects of structure on water. For example, the piers of a bridge whose structural design has been made with a high safety factor but the hydraulic design has been disregarded will narrow the flow cross-sectional area. The hydraulic changes caused by this narrowing can cause scours around bridge piers and after a while these scours can cause a substantial destruction.

In cases which there is no water structure on the river, methods such as Direct Step Method [1] and Standard Step

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

Geliş / Received: 23.08.2024 Kabul / Accepted: 23.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1537850

Method [2] can be used to determine the water surface profile. However, in cases which there is a structure on the river, the determination of the water surface profile becomes more complicated. The flow around bridge piers has been investigated experimentally and theoretically by many researchers in the past [3-12]. Two types of changes are observed in the open channels and rivers where the bridge structures are located. The first type of change is the local scours that occur at the bridge piers. These scours may reduce the stabilization of bridges and cause collapses in the future. Scour around bridge piers have been studied by Laursen [13] and various works. The second type is the afflux which is the main subject of this study. Afflux is the rise of water because the minimum specific energy level in the narrowing section is greater than the specific energy level of the flow. The level of afflux can be affected by parameters as flow rate, the geometry of the bridge, the span of the bridge piers and the geometry of the piers, etc. The water surface profiles that we investigate these affluxes which are the most important data used in flood control studies that will be caused by structures or bridges on the rivers. Many methods are used to obtain these data. The most used of them are; D'Aubuisson, Weisbach, Nagler, Lane, Yarnell, Kindswater, Izzard, Biery, and Delleur, Bradley (USBPR) methods [14]. In addition to these, Energy and Momentum methods are used.

When a bridge is built on an open channel, it narrows the cross section of the channel and obstruct the flow so that energy loss occurs. To overcome this energy loss, the upstream water level rises to a higher level than normal. This additional elevation is called afflux. After the water passes the bridge, the water level first decreases, and after a while it returns to its first condition (Figure 1)

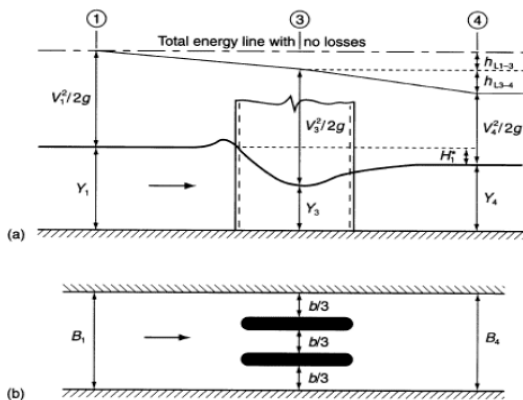


Figure 1. (a) Schematic representation of the rise of the water surface profile at the bridge entrance with a longitudinal section of uniform flow at normal depth, (b) Plan view of the flow (Les Hamill, Bridge Hydraulics) [15]

The effect of bridge piers on the flow has been investigated for more than 150 years. One of the earliest studies on this is d'Aubuisson's study in 1840 [3]. Later,

Nagler (1918) [4] and Yarnell (1934) [5] also conducted research on bridge piers. These studies were generally of similar type. These types were experimental studies carried out in smooth flow condition using long laboratory channels. One or more of the same type of bridge piers are positioned in the central part of the channel so that their effects on the channel can be measured. As a result of these studies, they came up with equations for finding water heights.

In this study, the numerical analysis results are validated by using the past experimental studies. These experimental results are presented in the study of "The Investigation Of Backwater Caused By Bridges On The River Experimental And With HEC-RAS" [16], which was previously carried out by Arzu Hadi at Erciyes University Hydraulics Laboratory in January 2017. Besides, the analysis results of the HEC-RAS program from the same study is used for comparison with FLOW-3D analysis results. These experiments were performed in an open channel made of glass measuring 0.6x0.6x9.5 m in Erciyes University Engineering Faculty Hydraulic Laboratory. Experiments were carried out for 6 different flow rates in 4 different bridge spans ($M=b/B= 0.83, 0.75, 0.67$ and 0.58). Here, B represents the channel width, while b denotes the bridge span. The water surface profiles resulting from these experiments are modeled for a single flow rate (21.23 l/sec) under the same conditions in the FLOW-3D program and compared with the water surface profile analysis data.

With the development of technology and the advancement of programming languages, many package programs are used for providing analysis with the help of these methods. Programs such as HEC-RAS, ISIS, and PHS are examples. In this study, the change of water surface profiles for three different opening conditions at a single flow rate will be calculated numerically using the Flow 3D package software. FLOW-3D commercially; It is a Computational Fluid Dynamics software used for different models and different purposes. Computational Fluid Dynamics; It is a technique of simulating the entire operation of the stream by providing analysis for each discretized cell separately using the Continuity Equation and the Navier-Stokes Equations. Using Computational Fluid Dynamics software is similar to experimental work in many ways. If the experimental work is modeled incorrectly with respect to reality, the results do not represent the real situation. Similarly, numerical modeling cannot show the real situation when entered incorrectly. (FLOW-3D user manual) [15] FLOW-3D software, developed and sold by Flow Science Incorporation which founded by C.W. Hirt in 1980, was released in 1985. FLOW-3D software, which performs the numerical analysis of the water surface based on the Volume Of Fluid [15] approach, which was added to the literature by C. W. Hirt, performs numerical analysis on Computational Fluid Dynamics. Recently, many researchers have published hydraulic analyzes with the FLOW-3D [17-25], but there are few studies on bridge hydraulics with the FLOW-3D software [26,27].

2 Methodology

2.1 Experimental study

Experiments in Arzu Hadi's work [27] were carried out in Erciyes University Engineering Faculty Civil Engineering Department Hydraulics Laboratory in a 60x60 cm and 9.5 m long channel. The construction material of the channel is glass. In the study, 4 different bridge types were used for 4 different flow conditions. All bridges have square feet and the features that distinguish bridges from each other are the number of spans. It was built with 4 different spans as one span, two spans, three spans and four spans, and experiments were carried out on these bridges. Factors such as the stabilization of the flow regime, the formation of the free surface profile, the examination of vortex shedding and separation zones, and the development of the boundary layer play a significant role in determining the placement of bridge piers. Considering all these factors, the bridges were placed 5.5 meters from the beginning of the 9-meter channel, and the effect of this bridge on the water surface profile was investigated. The data obtained in these experiments were compared with the data calculated by modeling in the HEC-RAS package program with 4 different methods (Energy, Momentum, Yarnell, WSPRO). In this study, the flow field will be numerically modeled with the FLOW 3D package program for one-two and three-opening bridge cases as shown in Figure 2. And 21.23 lt/sec value was used as the flow rate. The obtained data will be compared with the experimental studies of Arzu Hadi for the same flow conditions and the HEC-RAS package program data.

2.2 Bridge hydraulic modelling

In the modelling section of FLOW-3D, CGS (Centimeter-Gram-Second) unit system was used and free surface and uncompressed flow were entered as flow properties. The analysis time varied according to the models and was continued until it became stable. Since the channel used in the experiment has a slope of 0.001, the slope must be entered in the modeling, but the slope cannot be entered for the existing floor in the Flow-3D program. The slope value can only be given to the movement of the water. That situation can only be achieved by the vectorial distribution of the gravitational acceleration according to the slope. For this reason, in the gravity section, the values of 0.981 for the X component, 0 for the Y component, and -980.99 for the Z component are entered and inclination is given in the plane. The k-ε turbulence model is preferred in numerical simulations due to its simplicity, computational efficiency, robustness, and consistency with experimental results. It is suitable for modeling flows around cylinders, bridge piers, and other hydraulic structures where flow separation, vortex shedding, and turbulent boundary layers are critical phenomena. The k-ε model remains one of the most reliable and efficient tools for engineering applications where computational cost, time, and accuracy are all critical considerations. For all these reasons, the k-ε turbulence model was selected as the turbulence model.

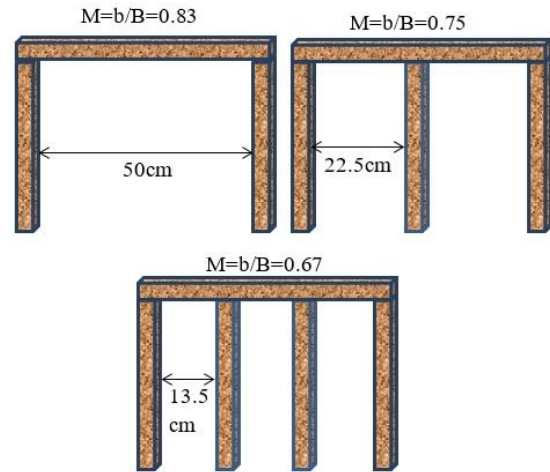


Figure 2. Bridge types in the experimental study to be used in this study

When starting the modeling process, first of all, the analysis region was created. Mesh stops were made according to the bridge geometry and a general analysis region was created. Since the bridges were positioned at the 5.50 m in the experiments, a second mesh block was also created, since the mesh density would be made between the 5 meters and 6 meters in the horizontal direction from the beginning, and a constriction zone was made in that block. After the bridge was created, all models were divided into cells and the mesh structure was created. While determining the mesh structure, computations were made in 5 different mesh structures on one span bridge to find the mesh variation with the lowest error rate, and the mesh structure with the lowest error rate was used for other bridge situations. In the study, it was observed that the mesh structure with the lowest error rate was the constricted mesh structure, the information of which will be given below. Mesh spacing was determined as 0.50 cm in the x direction for the whole computation zone, and 1 cm in the y and z directions, and 0.50 cm in all ratios in the constriction zone. In total, analysis were made with the help of 3660000 meshes.

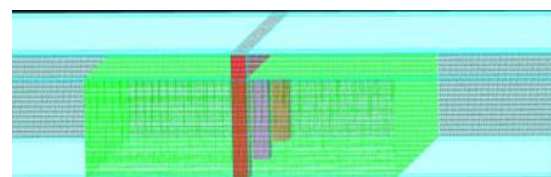


Figure 3. 3D view of constricted mesh zone of 3-pier bridge

3 Results and discussion

Arzu Hadi, who made the experimental study based on this study, in her study, saw that the computations made with the Energy, Momentum and Yarnell methods gave more accurate results than the WSPRO Method, and as a result, she published the analysis results made with the Energy Method mostly in the study, since there was no big difference between the other methods for comparative graphs [2]. In

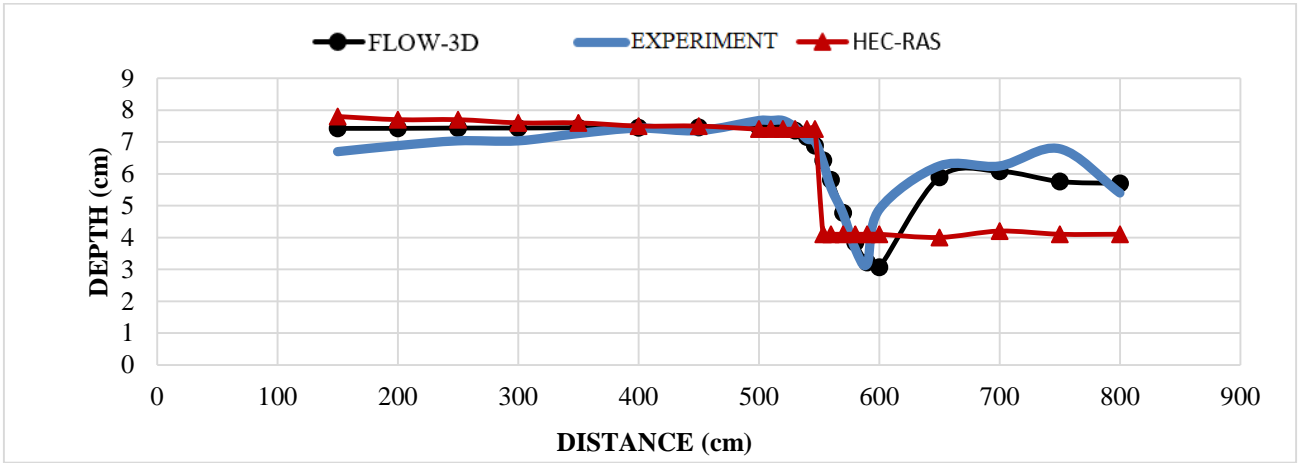


Figure 4. Water surface profiles for single span bridge

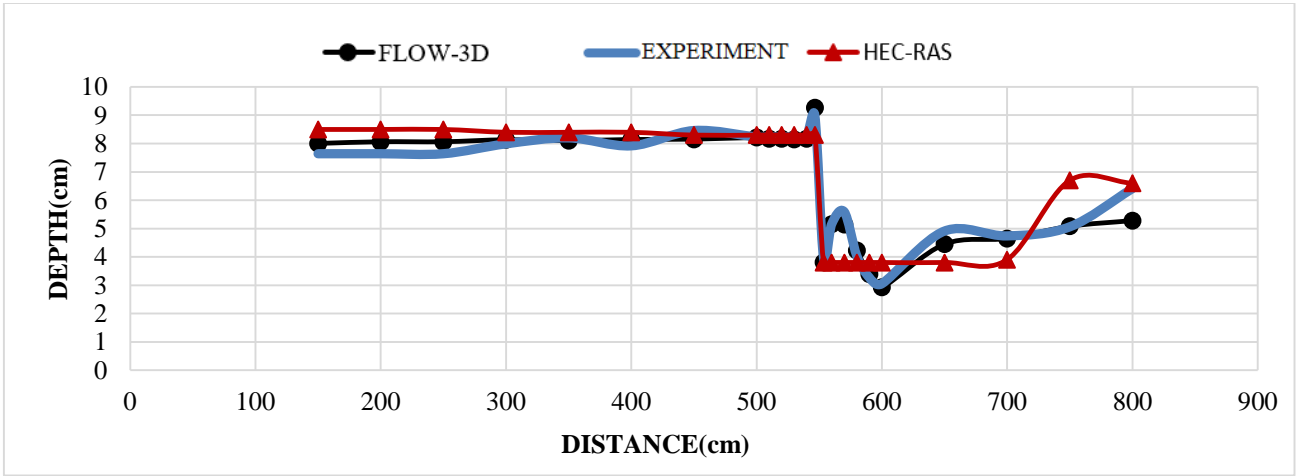


Figure 5. Water surface profiles for two span bridge

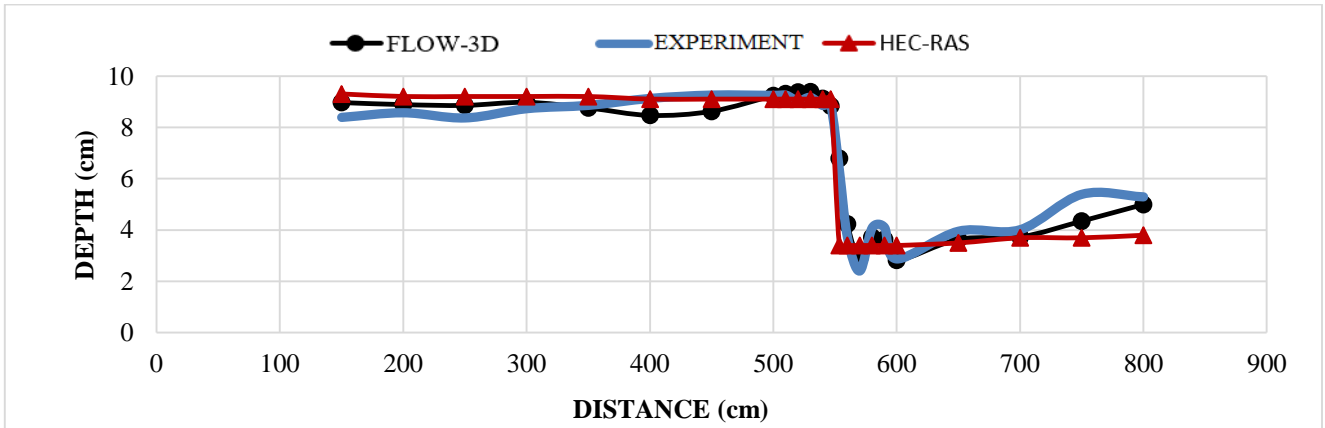


Figure 6. Water surface profiles for three span bridge

this study, when comparing the data of the HEC-RAS package program, the results of the computation made with the Energy Method will be used. . The flow through the bridge piers was calculated by dividing meshes with the Finite Volume Method, using the twoequation (k-ε) turbulence model. Calculated values were compared with experimental measurements and HEC-RAS analysis results

for 3 different bridge cases. Values taken from 23 different sections are given in the table. Comparisons were made by subtracting separate differences for each section on the table. In the comparison, the average of the differences of all sections was also calculated. While calculating the error rates, the formula as $\%Error = \left| \frac{WS_o - WS_c}{WS_o} \right| * 100$ was

applied. Here, WS_o shows the observed experiment result and WS_c shows the computation result. Comparisons were made with both tables and graphs of water surface profiles.. While making the graphic drawings, the drawings were not made according to the real scales, and the depth section was enlarged and the graphs were drawn in order to display it more clearly.

When Table 1 is examined, the average error rate in the calculations made with the HEC-RAS program is 14.77%, while the average error rate in the calculations made with the

Table 1. Comparative numerical results for single span bridge

Distance X (m)	Flow Depths		Difference (%)		
	Measured (cm)	Hec-Ras (Energy Method) (cm)	FLOW -3D	FLOW -3D	Hec-Ras
0.000	6.41				
1.000	6.88				
1.500	6.70	7.8	7.43	10.90	16.42
2.000	6.89	7.7	7.43	7.84	11.76
2.500	7.04	7.7	7.44	5.68	9.37
3.000	7.04	7.6	7.44	5.68	7.95
3.500	7.27	7.6	7.45	2.48	4.54
4.000	7.44	7.5	7.45	0.13	0.81
4.500	7.36	7.5	7.46	1.36	1.90
5.000	7.68	7.4	7.48	2.60	3.65
5.100	7.68	7.4	7.47	2.73	3.65
5.200	7.68	7.4	7.43	3.26	3.65
5.300	7.47	7.4	7.35	1.61	0.94
5.400	7.10	7.4	7.15	0.70	4.23
5.465	7.03	7.4	6.88	2.13	5.26
5.535	6.36	4.1	6.42	0.94	35.53
5.600	5.56	4.1	5.81	4.50	26.26
5.700	4.75	4.1	4.77	0.42	13.68
5.800	3.65	4.1	3.84	5.21	12.33
5.900	3.17	4.1	3.21	1.26	29.34
6.000	4.88	4.1	3.06	37.30	15.98
6.500	6.25	4.0	5.89	5.76	36.00
7.000	6.25	4.2	6.08	2.72	32.80
7.500	6.79	4.1	5.76	15.17	39.62
8.000	5.40	4.1	5.70	5.56	24.07
AVR				5.48	14.77

In the FLOW-3D program, the average error rate between 5.1 and 5.9 meters, which is the region where the flow reaches stability, was calculated as 5.48%. Compaction zone, decreased to 2.28%. Considering the analysis made in the HEC-RAS program, the error rate varied before and after the bridge. In the HEC-RAS results, the average error rate on the upstream side is 5.70%, while the mean error rate on the downstream side is 26.56%. When the graph in Figure 4 is examined, it is seen that the results of the HEC-RAS package program are uniform on the upstream and downstream sides and do not show the upstream and downstream fluctuations in the test results. It is seen that the results of the FLOW-3D

program, on the other hand, are quite close, although they do not exactly match the lines of the test results. It was observed that both numerical analysis gave values close to the experimental results in the afflux zone. According to the test results, while the maximum flow height in the affluxing region was 7.68 cm, it was determined as 7.48 cm in the FLOW-3D analysis and 7.40 cm in the HEC-RAS analysis

When Table 2 is examined, the average error rate in the analysis made with the HEC-RAS program is 10.71%, while the average error rate in the analysis made with the FLOW-3D program is 3.71%. In the FLOW-3D program, the average error rate decreased to 2.67% in the range of 5.10 and 5.90 meters, which is the compaction zone.

Table 2. Comparative numerical results for two span bridge

Distance X (m)	Flow Depths		Difference (%)		
	Measured (cm)	Hec-Ras (Energy Method) (cm)	FLOW -3D	FLOW -3D	Hec-Ras
0.000	7.00				
1.000	7.64				
1.500	7.64	8.5	8.00	4.71	11.26
2.000	7.64	8.5	8.06	5.50	11.26
2.500	7.64	8.5	8.06	5.50	11.26
3.000	7.99	8.4	8.13	1.75	5.13
3.500	8.20	8.4	8.1	1.22	2.44
4.000	7.92	8.4	8.14	2.78	6.06
4.500	8.46	8.3	8.15	3.66	1.89
5.000	8.23	8.3	8.21	0.24	0.85
5.100	8.23	8.3	8.17	0.73	0.85
5.200	8.23	8.3	8.17	0.73	0.85
5.300	8.23	8.3	8.15	0.97	0.85
5.400	8.23	8.3	8.17	0.73	0.85
5.465	9.00	8.3	9.26	2.89	7.78
5.535	3.97	3.8	3.81	4.03	4.28
5.600	5.16	3.8	5.15	0.19	26.36
5.700	5.59	3.8	5.14	8.05	32.02
5.800	4.04	3.8	4.23	4.70	5.94
5.900	3.27	3.8	3.39	3.67	16.21
6.000	3.05	3.8	2.93	3.93	24.59
6.500	4.91	3.8	4.45	9.37	22.61
7.000	4.74	3.9	4.65	1.90	17.72
7.500	5.06	6.7	5.08	0.40	32.41
8.000	6.41	6.6	5.28	17.63	2.96
AVR				3.71	10.71

Considering the analysis made in the HEC-RAS program, the error rate varied before and after the bridge. In the HEC-RAS results, the average error rate on the upstream side is 4.72%, while the mean error rate on the downstream side is 18.51%. When the graph in Figure 5 is examined, it is seen that the results of the HEC-RAS package program are uniform on the upstream and downstream sides, similar to the one-span bridge, and do not show the hydraulic jumps and fluctuations in the test results. It is seen that the results of the FLOW-3D program, on the other hand, are quite close,

although they do not exactly match the lines of the test results, as in the single-span bridge. It was observed that both numerical analysis gave values close to the experimental results in the afflux zone, but the values of FLOW-3D were closer to the experimental measurements. According to the test results, while the maximum flow height in the afflux zone was 9 cm, it was observed as 9.26 cm in the FLOW-3D analysis and 8.30 cm in the HEC-RAS analysis.

When Table 3 is examined, the average error rate in the analysis made with the HEC-RAS program is 12.04%, while the average error rate in the analysis made with the FLOW-3D program is 6.54%. In the FLOW-3D program, the average error rate increased to 7.44% in the range of 5.10 and 5.90 meters, which is the compaction zone.

Table 3. Comparative numerical results for three span bridge

Distance X (m)	Flow Depths		Difference (%)		
	Measured (cm)	Hec-Ras (Energy Method) (cm)	FLOW -3D	FLOW -3D	Hec-Ras
0.000	7.00				
1.000	7.64				
1.500	8.39	9.3	8.97	6.91	10.85
2.000	8.57	9.2	8.89	3.73	7.35
2.500	8.37	9.2	8.86	5.85	9.92
3.000	8.73	9.2	8.98	2.86	5.38
3.500	8.86	9.2	8.76	1.13	3.84
4.000	9.13	9.1	8.47	7.23	0.33
4.500	9.26	9.1	8.63	6.80	1.73
5.000	9.25	9.1	9.24	0.11	1.62
5.100	9.26	9.1	9.31	0.54	1.73
5.200	9.03	9.1	9.38	3.88	0.78
5.300	9.17	9.1	9.39	2.40	0.76
5.400	8.85	9.1	9.13	3.16	2.82
5.465	8.85	9.1	8.84	0.11	2.82
5.535	6.31	3.4	6.79	7.61	46.12
5.600	3.71	3.4	4.24	14.29	8.36
5.700	2.40	3.4	2.93	22.08	41.67
5.800	4.08	3.4	3.72	8.82	16.67
5.900	4.10	3.4	3.63	11.46	17.07
6.000	2.87	3.4	2.82	1.74	18.47
6.500	3.95	3.5	3.64	7.85	11.39
7.000	4.01	3.7	3.73	6.98	7.73
7.500	5.39	3.7	4.35	19.29	31.35
8.000	5.29	3.8	5.00	5.48	28.17
AVR			6.54	12.04	

Considering the analysis made in both programs, the error rate varied highly before and after the bridge. In the HEC-RAS results, the average error rate on the upstream side is 3.84%, while the mean error rate on the downstream side is 22.70%. In the FLOW-3D results, the average error rate on the upstream side is 3.44%, while the mean error rate on the downstream side is 10.56%. When the graph in Figure 6 is examined, it is seen that the results of the HEC-RAS package

program are similar to the first two bridge sections, and the results of the HEC-RAS package program are uniform on the upstream and downstream sides and do not show the hydraulic jumps and fluctuations in the test results. However, contrary to the first two sections, it was seen that the analysis of the HEC-RAS program gave closer values for the three-span bridge than the first two cases. As seen in the first two sections, the results of the FLOW-3D program appear to be quite close to the lines of the test results, although they do not exactly match. It was observed that both numerical analysis gave values close to the experimental results in the afflux zone. According to the test results, while the maximum flow height in the afflux region was 9.26 cm, it was observed as 9.39 cm in the FLOW-3D analysis and 9.10 cm in the HEC-RAS analysis.

While using the FLOW-3D program, 2 types of mesh regions were used and the average error rates were calculated for these two separate mesh regions. In Table 4, these error rates are given for both mesh regions. Mesh 1 represents the general mesh zone, and mesh 2 represents the constricted mesh zone.

When Table 4 is examined, while the compaction region gives more accurate results for the first two case bridge sections, the compacted region gives more inaccurate results in the case of a three-span bridge. The reason for this is that there are bridge piers in the constriction region, and since the program has difficulty in analyzing the current passing through the three-span bridge, the constriction region has given inaccurate results.

Table 4. Average differences for mesh zones

Bridge Types	Mesh 1	Mesh 2
Single Span Bridge	7.94	2.28
Two Span Bridge	4.51	2.67
Three Span Bridge	5.84	7.44

On the other hand, in this study, different mesh patterns were tried to determine the correct mesh variation for the single-span bridge, and accordingly, the mesh pattern with the least error rate was used in the other stages of the study. Table 5 shows the average error rates, times of becoming steady and computation times of all tested mesh patterns for the single span bridge.

Table 5. Results for mesh patterns in different variations

Pattern types	Difference	Computation times	Times of becoming steady	Total number of meshes
Large mesh	5.84	1 h 29 min	22 sec	358160
Very large mesh	5.60	59 min	40 sec	227392
Wide constricted	6.62	52 h	44 sec	5580000
Standart mesh	5.78	4 h 2 min	52 sec	2700000
Constricted mesh	5.48	18 h	50 sec	3660000

When Table 5 is examined, it is seen that both the computation times are prolonged and there are no significant improvements in the difference rates if the mesh constriction is made too wide.

4 Conclusions

As a result; When all three bridge cases are compared, it has been observed that the FLOW-3D program analysis for most parameters produce values closer to the experimental results than the HEC-RAS program analysis. Both program analysis gave the lowest error rates in the two-span bridge section. The FLOW-3D program gave the highest error rate in the case of a three-span bridge, while the HEC-RAS program gave the highest error rate in the case of a single-span bridge. These error rates are given in Table 6.

Table 6. Average Differences

Bridge Types	FLOW-3D	HEC-RAS
Single Span Bridge	5.48	14.77
Two Span Bridge	3.71	10.71
Three Span Bridge	6.54	12.04

It has been observed that the FLOW-3D program, which solves with the help of the Finite Volume Method using the twoequation ($k-\epsilon$) turbulence model, gives more accurate results than the HEC-RAS program, which solves the water surface profiles using the Energy, Momentum, Yarnell and WSPRO methods in cases where there are bridge piers in open channel flows. For this reason, the FLOW-3D program is recommended for bridge pier problems in open channel flows. When solving with the FLOW 3D program, it is recommended that the mesh patterns should be made without too much constricting, taking into account the computation processes.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Rate (Turnitin): %5

References

- [1] M. H. Chaudry, Open Channel Flow. New York: Springer Science+Business Media, 2008.
- [2] F. M. Henderson, Open Channel Flow. New York: MacMillan Company, 1966.
- [3] J.F.D.A. Voissins, Traité d'hydraulique: à l'usage des ingénieurs. Pitois-Levrault, 1840.
- [4] D. L. Yarnell, Bridge piers as channel obstructions. No. 442. US Department of Agriculture, 1934.
- [5] P. Dubuat, Principes d'hydrauliques vérifiés par un grand nombre d'expériences, 1786.
- [6] P. F. Biery and J. W. Delleur, Hydraulics of single span arch bridge construction. Journal of the Hydraulics Division, 88.(2), 75-108, 1962. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000711>
- [7] G.V. Skogerboe, Comparison of Bridge Backwater Relations. Journal of the Hydraulics Division, 99,6, 921-938, 1973. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003665>
- [8] G. Seckin, R. Yurtal, and T. Haktanir, Contraction and expansion losses through bridge constrictions. Journal of Hydraulic Engineering 124.5,546-549, 1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:5\(546\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:5(546))
- [9] F. Ahmed, and N. Rajaratnam, Flow around bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 124.3,288-300, 1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:3\(288\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:3(288))
- [10] J. Hunt, G.W. Brunner and B. E. Larock, Flow transitions in bridge backwater analysis. Journal of Hydraulic Engineering, 125.9, 981-983, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:9\(981\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:9(981))
- [11] R.J. Charbeneau and E.R. Holley, Backwater effects of bridge piers in subcritical flow. USA: Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin, 2001.
- [12] E.M. Laursen, Bridge design considering scour and risk. Transportation Engineering Journal of ASCE 96.2, 149-164, 1970. <https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000079>
- [13] K.J. Kaatz and W. P. James Analysis of alternatives for computing backwater at bridges. Journal of Hydraulic Engineering, 123.9, 784-792, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:9\(784\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:9(784))
- [14] C. W. Hirt and B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of computational physics, 39.1 ,201-225, 1981. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- [15] F.S. Inc., Flow-3D User's Manuals, 2017.
- [16] A.M.W.M.H.M. Hadi, Akarsu Üzerindeki Köprülerin Neden Olduğu Kabarmannın Deneysel Ve Hec-Ras İle İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [17] L.G. Castillo and J. M. Carrillo, Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump. International Journal of Multiphase Flow, 92, 171-180, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.03.006>
- [18] N. Soydan, O. Şimşek, and M. Aköz, Prediction and validation of turbulent flow around a cylindrical weir. European water, 57, p. 85-92, 2017.
- [19] J. Vives-Costa, J.J. De-Felipe, and E. Pena-Pitarch, Numerical model for a nineteenth-century hydrometric module. Journal of irrigation and drainage engineering, 145.11, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001415](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001415)
- [20] E.H.H. Al-Qadami, et al, Numerical modelling of flow characteristics over sharp crested triangular hump. Results in Engineering, 4, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100052>
- [21] R. Kaurav and P.K. Mohapatra, Studying the peak discharge through a planar dam breach. Journal of Hydraulic Engineering, 145, 6, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001613](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001613)



- [22] A. M. Helmi, H. T. Essawy, and A. Wagdy, Three-dimensional numerical study of stacked drop manholes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145, 9, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001414](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001414)
- [23] M. İlkentapar and A. A. Öner, Geniş Başlıklı Savak Etrafındaki Akımın İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6.2, 615-626, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.341819>
- [24] H. K. Jalal and W. H. Hassan, Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 745, No. 1, IOP Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012150>
- [25] M. Ghasemi and S. Soltani-Gerdefaramarzi, The scour bridge simulation around a cylindrical pier using Flow-3D, *Journal of Hydrosiences and Environment*, 1.2, 46-54, 2017. <https://doi.org/10.22111/jhe.2017.3357>
- [26] L. Hamill, *Bridge Hydraulics*, CRC Press, 1998.
- [27] A.M.W.M.H.M. Hadi, Akarsu Üzerindeki Köprülerin Neden Olduğu Kabarmannın Deneysel Ve Hec-Ras İle İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2017.





Şebeke bağlantılı fotovoltaik panel destekli elektrikli araç şarj istasyonlarının analizi

Analysis of grid-connected photovoltaic panel assisted electric vehicle charging stations

Enes Talha Tamgacı^{1,*} , Murat Ünlü² 

^{1,2}Kocaeli Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41040, Kocaeli, Türkiye

Öz

Günümüzde, çevre dostu ve sürdürülebilir bir ulaşımın önemi giderek artmaktadır. Bu bağlamda, elektrikli araçlar önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Buna bağlı olarak her geçen gün elektrikli araçların kullanımı artmaktadır. Elektrikli araçların kullanımının arttığı bu dönemlerde önemli konulardan birisi de elektrikli araç şarj istasyonlarıdır. Bu makalede elektrikli araç şarj istasyonu önemi ve seviyeleri, AA ve DA şarj istasyonu farkları ortaya konmuştur. Son olarak, 3 farklı şarj istasyonu senaryosu tasarlanmıştır. 36 kW, 144 kW, 900 kW şarj istasyonuna ve diğer yüklerle sahip sistemlerin genel yük durumuna göre fotovoltaik (FV) panellerin şebekeden güç talebini %72.5, %64.7, %58.2 oranında azaltarak karbon salınımını 13 ton ve 430 ton azaltabileceğini ortaya koyan farklı senaryolar modellenmiş ve teknik yönden analizi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç şarj istasyonları, Fotovoltaik paneller, Simülasyon, HOMERGrid, Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem

1 Giriş

Günümüzde, çevre bilinci ve sürdürülebilirlik hedefleri küresel çapta giderek daha fazla öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, ulaşım sektörü de büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Fosil yakıtlara dayalı geleneksel içten yanmalı motorlar, atmosfere zararlı emisyonlar yayarak çevresel sorunlara ve iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak, elektrikli araçlar önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara kıyasla çevre dostu bir ulaşım çözümü sunarlar. Elektrikle çalışan motorlar, sıfır emisyon üretir ve dolayısıyla hava kalitesini artırırken, karbon ayak izini azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede katkıda bulunurlar. Ayrıca, elektrikli araçlar enerjiyi daha verimli bir şekilde kullanır ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı olarak şarj edildiklerinde tamamen karbon nötr olabilirler.

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte şarj istasyonlarının da geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Abstract

The importance of environmentally friendly and sustainable transportation is increasing. In this context, electric vehicles stand out as an important solution. Accordingly, the use of electric vehicles is increasing day by day. One of the important issues in these periods when the use of electric vehicles is increasing is electric vehicle charging stations. This article reveals the importance and levels of electric vehicle charging stations, the differences between AA and DC charging stations. Finally, 3 different charging station scenarios were designed. Different scenarios were modeled and technical performance analysis was performed, which revealed that photovoltaic (PV) panels can reduce the power demand from the grid by 72.5%, 64.7%, and 58.2%, and carbon emissions from 13 tons to 430 tons, depending on the overall load change of systems with 36 kW, 144 kW, 900 kW charging stations and other loads.

Keywords: Electric vehicle charging stations, Photovoltaic panels, Simulation, HOMERGrid, Grid-connected photovoltaic system

Elektrikli araç şarj istasyonları, araçların bataryalarını şarj etmek için gerekli olan elektrik enerjisini sağlar. Elektrikli araç şarj istasyonları genellikle birkaç bileşenden oluşur. Bu bileşenler güç kaynakları, konnektörler, dönüştürücüler ve bataryadır. Bu sistemler tasarlanırken IEC, ISO ve EPDK gibi kurumların standartlarına uygun olarak tasarlanmalıdır.

Elektrikli araç şarj istasyonları genellikle farklı seviyelerde sınıflandırılır. Bunların her biri farklı güç seviyeleri ve şarj hızlarına sahiptir, bu da kullanıcıların ihtiyaçlarına ve kullanım senaryolarına göre tercih edilecek olanı belirler. Seviye 1 şarj istasyonları ev tipi prizler aracılığıyla düşük güçte şarj imkânı sunarken, Seviye 2 şarj istasyonları daha yüksek güç ve hız sağlar ve genellikle evlerde veya ticari alanlarda bulunur. Seviye 3, yani hızlı şarj istasyonları ise en yüksek güç ve hızda şarj sağlar ve genellikle otoyollar ve alışveriş merkezleri gibi yoğun kullanım alanlarında bulunur.

AA (alternatif akım) ve DA (doğru akım) şarj istasyonları arasındaki temel fark, enerjinin araca iletilme şeklidir. AA şarj istasyonlarında alternatif akım her araç için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tamgacienestalha@gmail.com (E. T. Tamgacı)

Geliş / Received: 26.09.2024 Kabul / Accepted: 24.12.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1555555

ayrı şekilde doğru akıma çevrilir. DA şarj istasyonlarında ise doğrudan tüm istasyon DA hata sahip olur ve aracın bataryasına doğru doğru akım sağlar.

Şarj istasyonlarının yanı sıra, şebeke kapasitesi ve şarj yönetimi de önemli bir konudur. Elektrikli araçların yoğun kullanımı durumunda şebeke aşırı yüklenmesini önlemek için akıllı şarj yönetimi sistemleri kullanılır. Bu sistemler, elektrik talebini dengelemek ve şarj istasyonlarının etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak için şarj hızlarını ve zamanlamalarını ayarlarlar. Tüm bu faktörler, elektrikli araçların yaygınlaşması için etkili bir şarj altyapısının oluşturulmasını gerektirir. Bu altyapı, ev tipi şarj cihazlarından hızlı AA ve DA şarj istasyonlarına kadar çeşitli seviyelerde şarj imkanı sunmalıdır. Ayrıca, akıllı şarj yönetimi sistemleriyle şebeke entegrasyonu ve kullanım verimliliği sağlanmalıdır. Bu şekilde, elektrikli araçların yaygınlaşması için gerekli altyapı sağlanabilir ve sürdürülebilir bir ulaşım geleceği inşa edilebilir.

Elektrikli araç (EV) şarj istasyonlarının güneş enerjisiyle desteklenmesi, yenilenebilir enerji teknolojileri ve sürdürülebilir taşımacılık alanlarında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Literatürde, bu alandaki çalışmalarda yenilikçi sistemlerin teknik, ekonomik ve çevresel katkıları detaylı olarak ele alınmıştır.

Bir çalışmada, enerji depolama sistemleri (ESS) ile entegre edilmiş güneş enerjisi tabanlı şarj istasyonlarının, maksimum güç noktası izleme (MPPT) teknolojisi ile enerji üretimini optimize ettiği gösterilmiştir. Bu tür sistemlerin, şebekeden bağımsız olarak sürdürülebilir enerji sağlama potansiyeli taşıdığı ifade edilmiştir [1].

Bir diğer araştırma, fotovoltaik (PV) sistemlerin "şarj ederken park etme" konseptine uygun çözümler sunduğunu ortaya koymuştur. Bu sistemlerin, güneş ışığından doğrudan yararlanarak EV'leri şarj etme imkanı tanıdığı ve karbon ayak izini azalttığı vurgulanmıştır. Ancak, kesintili enerji üretimi ve kapasite limitleri gibi zorluklar dikkat çekmektedir [2].

Çin'de, enerji sektörü en büyük karbon salımcısı ve ulaşım sektörü en hızlı büyüyen karbon salımcısı olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, bir çalışmada Shenzhen şehrinde güneş enerjisiyle çalışan bir elektrikli araç şarj istasyonu modeli önerilmiştir. Model, günlük 4500 kWh enerji talebini karşılayacak şekilde tasarlanmış ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Örneğin, bu modelle karbon dioksit, kükürt dioksit ve azot oksit salınımlarında sırasıyla %99.8, %99.7 ve %100 oranında azalma sağlanabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, maliyet analizinde enerji üretim maliyetinin, sistemin ekonomik sürdürülebilirliğini desteklediği görülmüştür. Bu çalışma, karbon fiyatlandırmasının yenilenebilir enerjiye olan yatırımı nasıl teşvik edebileceğini de ele almıştır ve sonuçlar, karbon fiyatının ton başına 20 doların üzerine çıktığında daha etkili olduğunu göstermiştir [3].

Bir diğer çalışmada, güneş enerjisi destekli EV şarj istasyonlarında DC mikro şebekelerin kullanımını incelemiştir. Sistemde, sabit batarya depolama, PV paneller ve şebeke bağlantısı birlikte kullanılmıştır. Çalışma, yavaş şarj modlarının uzun park sürelerinde PV enerjisinden maksimum faydayı sağladığını ve şarj maliyetlerini

düşürdüğünü göstermiştir. Buna karşın, hızlı şarj modlarının daha yüksek maliyetlerle şebekeye bağlı olduğu vurgulanmıştır. Bu sistemin, güneş enerjisinin EV şarj altyapısına entegrasyonu için etkili bir çözüm olduğu ifade edilmiştir [4].

2023 yılında gerçekleştirilen Pakistan'daki farklı şehirler için şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem ile elektrikli araçlar şarj istasyonu tasarımı, mevcut akaryakıt istasyonlarının mevcut çatı alanına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, modelleme çalışmaları, mevcut akaryakıt istasyonlarının ortalama çatı alanlarına Lahor ve İslamabad'da ek PV sistemleri kurularak güneş enerjisi yararlanmayı 72 kWh kadar artırılabilirliğini öne sürmüştür [5]. Aynı yıl Bağladeş'te yapılan başka bir çalışmada, Dhaka-Mawa Otoyolu boyunca 20 EA için 300 kWp güneş enerjili EA şarj istasyonunun ayrıntılı tasarımını PVsyst 7.2 yazılımı ile yapılmış olup, sistemin 25 yıllık ömrü boyunca net 6.460,2 ton CO₂ azaltımı sağlaması beklenmektedir [6]. 2024 yılında ArcGIS10.8.2 analiz proramı kullanılarak yapılan çalışma teknik, ekonomik ve çevresel verilere dayanmaktadır. Özellikle, bu eyaletteki Mahshahr İlçesi, şarj istasyonları için gereken enerjinin %90.55'ini güneş enerjisiyle sağlanabileceği ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada, bu alanın 2040 yılına kadar araçların %11'ini elektrikli arabalara dönüştürme kapasitesine sahip olduğunu ve CO₂ emisyonlarını 30 tondan fazla azaltılabileceğini göstermiştir [7].

Antalya'da gerçekleştirilen bir çalışmada; fotovoltaik (PV) paneller ve şebeke bağlantılı bir hibrit güç sistemi (HPS) kullanılarak EV şarj altyapısı modellenmiş ve optimize edilmiştir. HOMER yazılımı kullanılarak farklı senaryolar, teknik, ekonomik ve çevresel kriterler açısından değerlendirilmiştir. Antalya'nın yüksek güneş ışınım seviyeleri (ortalama günlük 4.5 kWh/m²) göz önüne alındığında, doğru PV kapasitesinin yük profilleriyle eşleştirilmesiyle hem enerji verimliliği artırılmış hem de şebekeye olan bağımlılık azaltılmıştır [8].

FV sistem destekli şarj istasyonu için konum seçimi önemli bir konudur. 2022 yılında İran'da gerçekleştirilen bir çalışmada İran'ın Kış Adası'na inşa edilmesi planlanan bir güneş enerjili araç şarj istasyonu, GIS ve çok değişkenli parametrelerle seçildi. İstasyon seçilirken parklara, restoranlara, kentsel yoğunluğun olduğu kamusal alanlara yakınlık, ana arter ve kavşaklara yakınlık, toplu taşımaya yakınlık, havaalanları ve köprülere yakınlık, erişilebilirlik vb. kriterler incelenmiş ve nihai karar lokasyon seçiminde verilmiştir [9]. 2023 yılında Birleşik Krallık'taki Nottingham Üniversitesi'ndeki bir park alanında uygulama için bir PV güneş enerjisi sistemi tarafından taşınmıştır. EV'lerin şarj talebini hesaplamak için stokastik bir yaklaşım kullanılmıştır. Ayrıca, çalışma 3kW ve 7kW kapasiteli şarj cihazlarının en iyi kombinasyonunu belirlemek için altı farklı şarj istasyonu senaryosu sunmaktadır. Bu çalışma, 3kW ve 7kW kapasiteli şarj cihazlarının gelecekteki şarj istasyonu kombinasyonunun ön araştırmasını sağlayacaktır. Bu çalışma, şarj kapasitesi ve şarj oranının, güneş enerjisi potansiyelinin ve kurulumun ekonomik uygulanabilirliğinin en iyi kombinasyonunu değerlendirmek için kampüs park alanlarına kurulacak gelecekteki şarj istasyonlarının ön

araştırması yapılmıştır. Bu çalışma ile sistemin günde 36.8 kg CO₂'ye kadar tasarruf edilebileceği ve dolayısıyla sıfır karbon hedeflerine de büyük destek sağladığını ortaya koymuştur [10]. 2024 yılında FV sistem ile bütünleşik elektrikli araç şarj istasyonunda depolama sistemi uygulaması yapılmıştır. Elektrikli araç şarj istasyonu güç yönetim şemasını Matlab ve Opal RT simülasyonu ile doğrulamak için, fotovoltaik panel gücüne ve yüküne göre farklı çalışma koşulları dikkate alınmış. Farklı koşullar altındaki sonuçlar karşılaştırılmış ve incelenmiştir [11]. 2024 yılında Rüzgar ve güneş enerjisiyle çalışan net sıfır enerjili bir şehirde akıllı elektrikli araç şarjı ve V2G (araçtan şebekeye) ile şehir ölçeğinde bir enerji eşleştirme optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. [12].

Bu literatür taraması, güneş enerjisi destekli EV şarj istasyonlarının hem sürdürülebilir taşımacılıkta hem de yenilenebilir enerji kullanımında önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, elektrikli araç şarj istasyonlarının yapısını, farklı seviyelerini, AA ve DA şarj istasyonları arasındaki farkları detaylı bir şekilde ele almaktır. Aynı zamanda bu çalışmanın sonunda yapılan simülasyon sayesinde bu konuda bilgi sahibi olmak isteyen araştırmacılara, fotovoltaik panel destekli 3 farklı şarj istasyonu örneği sunarak elektrikli araç endüstrisine dair bir perspektif sunulacaktır. Bu 3 senaryodaki şarj istasyonları 36 kW (AA Seviye 2), 144 kW (AA Seviye 2), 900 kW (Seviye 3 Hızlı Şarj) olarak belirlenmiştir. Bütün senaryolarda hem şarj istasyonu yükleri için hem de şarj istasyonunun kurulduğu bölgedeki diğer yükleri karşılaması için güneş panelleri entegre edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından destek alınarak şebekedeki talebi azaltmak ve karbon salınımını azaltmak hedeflenmiştir.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada, NREL (Amerikan ulusal araştırma laboratuvarı) tarafından geliştirilmiş olan HOMERGrid simülasyon programı kullanılmıştır. Bu simülasyon programı enerji sisteminin tasarım işini kolaylaştırır, modelleyicinin bağımsız, uygun maliyetli, verimli ve şebekeden bağımsız veya şebeke bağlantılı olabilen dağıtılmış üretim sistemleri için çeşitli enerji sistemi tasarımları tasarlamasına ve bunlar arasında bir karşılaştırma yapmasına yardımcı olur. Enerji sistemi yapılırken ihtiyaç duyulan sistemin toplam kapasitesi, bağlı yük verileri, mevcut enerji kaynağı verileri ve her elemanın maliyet tahmini gibi simülasyon için yazılıma verilmesi gereken belirli özellikler vardır. Net mevcut maliyet ve enerji üretim maliyetine dayalı olarak en uygun maliyetli enerji sistemini ortaya koymak mümkündür.

Bu çalışmada üç farklı fotovoltaik panel destekli şebeke bağlantılı elektrikli araç şarj istasyonlarının simülasyonları HOMER programı kullanılarak yapılmıştır. Senaryo 1'de ev tipi FV panel destekli; Senaryo 2'de iş yeri veya üniversite gibi bir yerdeki FV panel destekli şarj istasyonu ve son olarak Senaryo 3'de üniversite, fabrika, avm veya otopan üzeri hızlı şarj istasyonu olan bir tesis için bir enerji sistemi için modelleyiciye verilen, mali ve teknik fizibilite kriterlerine göre ağırlıklandırılan çok sayıda tasarım

seçeneği vardır. Bu çalışmada enerji tüketimleri üzerine analizler gerçekleştirilmiştir.

3 Elektrikli araç şarj istasyonları

Şarj istasyonu seviyelerinin arasındaki temel farklılık çıkış güçleridir. Çıkış gücü şarjın hızını yani süresini belirlemektedir. Seviye 1 AA şarj istasyonları, seviye 2 AA şarj istasyonları, seviye 3 AA ve DA şarj istasyonları olmak üzere 3 başlıkta incelenmiştir.

3.1 Seviye 1 şarj istasyonu

AA Seviye 1 şarj istasyonunda 120V/12-16A ile araç direkt olarak prizden şarj edilebilir. 1.5 kW'tan 3.5 kW'a kadar güç çekebilir. Bu seviyenin %100 şarj durumuna ulaşması ortalama 8-12 saat sürecektir. Seviye 1 şarj istasyonunun avantajı, evler ve ofis siteleri için ek bir altyapıya ihtiyaç duyulmamasıdır. Diğer şarj istasyonlarına göre maliyeti en düşük olan şarj istasyonudur [13].

3.2 Seviye 2 şarj istasyonu

AA Seviye 2 şarj istasyonlarında 230V/12-80 A gerilim ve akım değerlerinde tek fazlı veya üç fazlı olarak araç şarj edilebilir. Bu modda araç direkt olarak prizden şarj edilmez. Şarjı kontrol edebilmemize yarayan bir adaptör bulunur. Bu seviyedeki bir şarj istasyonunda şarj olan aracın %100 şarj durumuna ulaşması ortalama 4-8 saat sürecektir. 5 kW'tan 30 kW'a kadar güç çekebilir Seviye 2 şarjın birçok avantajı olmasına rağmen, güç tüketiminin %25'e kadar çıkabilmesi gibi bazı dezavantajları da vardır [14]. AA seviye 2 şarj istasyonu kurulmasının maliyeti, AA seviye 1 şarj istasyonuna göre daha fazla olmasına rağmen daha kısa şarj süresi nedeniyle elektrikli araç kullanıcıları seviye 2 şarj teknolojisini tercih etmektedir.

3.3 Seviye 3 şarj istasyonu

Seviye 3 şarj istasyonları AA ve DA olarak 2 başlıkta incelenmiştir. Bu şarj istasyonları hızlı şarj istasyonu olarak bilinmektedir. Fosil yakıtlı araçların kullandığı benzin istasyonları gibi ticari amaçla; otopan, alışveriş merkezi gibi yerlerde kullanılır.

3.3.1 AA seviye 3 şarj istasyonu

AA Seviye 3 Şarj, 230-480 V/32-250 A olarak tek fazlı veya üç fazlı olarak kullanılabilir. Bu mod için AA hızlı şarj istasyonu da denmektedir. Bu seviyedeki şarj istasyonları kişisel değil genelde ticari amaçla kullanılmaktadır.

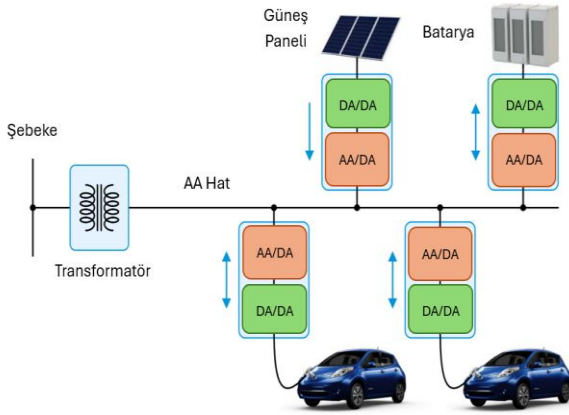
3.3.2 DA hızlı şarj istasyonu

DA hızlı şarjın gerilim-akım seviyesi 1000 V/400A'e kadar çıkmaktadır. DA hızlı şarjın temel avantajlarından biri, şarj süresinin diğer şarj seviyelerine göre daha kısa olmasıdır. Ancak bu ücretlendirmenin maliyeti yüksektir. Arıza oluşması durumunda üst düzey koruma sistemine ihtiyaç duyar. DA hızlı şarj zamandan tasarruf sağlasa da batarya ömrünü kısaltabilir ve her araç DA hızlı şarj için uygun değildir [15].

3.4 AA ve DA şarj istasyonlarının karşılaştırılması

3.4.1 AA baraya sahip şarj istasyonları

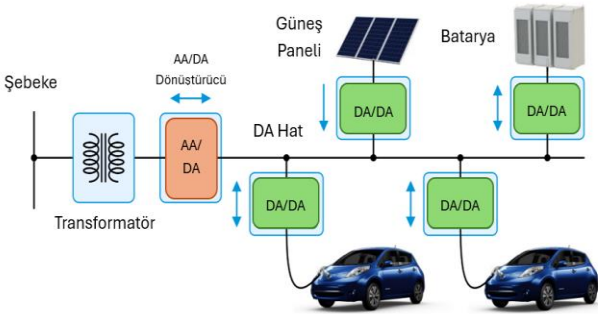
AA hata sahip şarj istasyonlarında düşürücü transformatör bulunur. Her şarj cihazı ayrı bir AA/DA dönüştürücü mevcuttur. Her şarj cihazı için dönüştürücü olması ve sistemde dönüşüm aşamalarının fazla olması sistem karmaşıklığını ve maliyetini artırırken sistem verimliliğini de azaltır. AA hat kullanmanın avantajları arasında doğrultucu ve invertör teknolojisinin kullanılabilirliği, AA anahtarlama donanımı ve koruyucu cihazların kullanılabilirliği ve AA güç dağıtım sistemleri için köklü standartlar ve uygulamalar yer alır [14]. AA hata sahip şarj istasyonunun özelliklerinin gözlemlenebileceği şema Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. AA baraya sahip şarj istasyonu şeması [14]

3.4.2 DA baraya sahip şarj istasyonları

Şarj hattını DA yapmak için merkezi AA/DA dönüştürücü kullanılır. Bu dönüşüm, DA enerji depolama ve yenilenebilir enerji arasında arayüz oluşturmanın enerji açısından daha verimli bir yolunu sağlar.



Şekil 2. DA baraya sahip şarj istasyonu şeması [14]

DA baraya sahip şarj istasyonlarının tasarımı, yukarıda bahsedilen AA hata sahip şarj istasyonlarıyla aynı standartlara uygun olmalıdır. Her bir şarj cihazı, ayrı AA/DA dönüştürücüleri ortadan kaldırarak DA hat ile bir DA/DA dönüştürücü arasında arayüz oluşturur. AA-DA dönüştürücü sayısı azaltılarak sistem verimliliği, AA bağlantılı sistemlere

kıyasla artırılır. DA hattın avantajlarından birisi de DA sistemlerde reaktif gücün bulunmamasıdır. Şebeke ile tek invertörün ara bağlantısı aynı zamanda ana şebekeden ayrılmayı ve ana şebekeye bağlantıyı da kolaylaştırır. DA dağıtım sistemlerinin diğer bir avantajı, DA bara ile araç arasında arayüz oluşturmak için kısmi güç dönüştürücülerini kullanma fırsatıdır. Bu kısmi güç dönüştürücüler, araca iletilen gücün yalnızca bir kısmını işleyerek dönüştürücü değerlerini düşürür ve dolayısıyla maliyeti düşürür ve dönüştürme verimliliğini artırır. DA hata sahip şarj istasyonunun özelliklerinin gözlemlenebileceği şema Şekil 2’de verilmiştir. Yukarıda verilen bilgilere bağlı olarak AA ve DA şarj istasyonlarının güç, kullanım yerleri, şarj süreleri, araç tipleri karşılaştırması Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Seviyelerine göre şarj istasyonları [13]

Seviye	Güç (kW)	Kullanım Yerleri	Şarj Süresi
AA Seviye 1	1.5-3.5	Ev /ofis	8-12 Saat
AA Seviye 2	5-30	Özel Ticari işletme	4-8 Saat
AA Seviye 3	30-350	Ticari Alanlar Alışveriş Merkezleri	20-50 Dakika
DA Hızlı Şarj	>350	Otoban Alışveriş Merkezleri	10-20 Dakika

Tablo 2. Firmalara göre hızlı şarj istasyonlarının karşılaştırılması [14]

Üretici	ABB Terra 53	Phihong	Tesla Supercharger	ABB Terra HP
Güç	50 kW	120 kW	135 kW	350 kW
Konnektör Tipi	CCS Type 1 CHAdeMO1.0	GB/T	Supercharger	SAE Combo-15 CHAdeMO1.2
Giriş Gerilimi	480 Vaa	380Vaa-480Vaa (±15%)	380-480 Vaa	400 Vaa (±10%)
Çıkış Gerilimi	200-500 V	200-750 V	50-410V	150-920 V
Çıkış Akımı	120 A	240 A	330 A	375 A
300 km için gereken şarj süresi	72 dakika	30 dakika	27 dakika	10 dakika

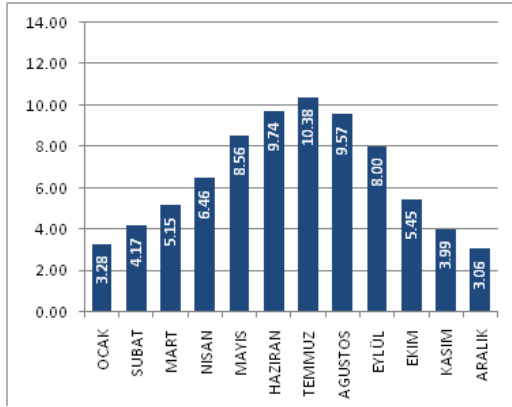
Elektrikli araç şarj istasyonu üreten birçok firma vardır. Tablo 2’de güncel olarak üretilen ve kullanımı yaygın olan şarj istasyonları verilmiştir.

4 Şarj istasyonu simülasyonları

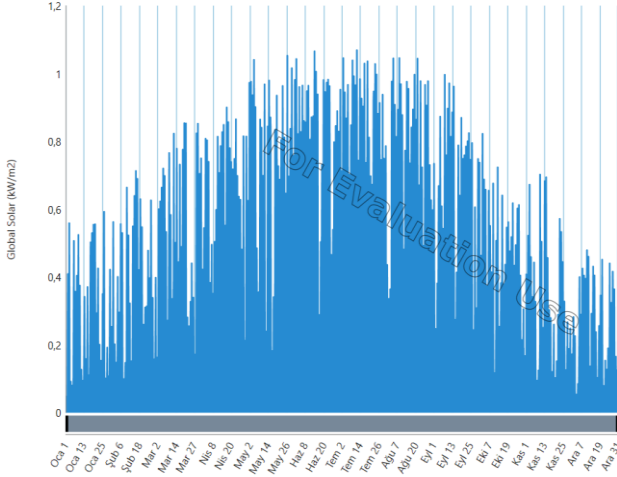
Simüle edilmek üzere 3 farklı şarj istasyonu senaryosu belirlenmiştir. Tüm sistemler FV panellerle desteklenerek şebekeden istenen güç azaltılmış ve aynı zamanda şebekeye satışı da yapılarak tasarruf sağlanmıştır. FV paneller sadece şarj istasyonunun ihtiyacını karşılamak için değil, sistemin kurulduğu yerdeki (ev, işyeri, üniversite, alışveriş merkezi) diğer yüklere enerji sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. FV panelden üretilen enerjiyi depolamak için lityum-iyon batarya ve dönüştürücü de sistemlere eklenmiştir. Senaryolar:

1. AA Seviye 2 - 36 kW Şarj İstasyonu
2. AA Seviye 2 – 144 kW Şarj İstasyonu
3. AA Seviye 3 - 900 kW Hızlı Şarj İstasyonu

Bu sistemlerin kurulacağı bölgenin yıllık güneşlenme süresi Şekil 3'te aylık oratama (Şekil 3a) ve saatlik olarak verilmiştir (Şekil 3b).



(a)



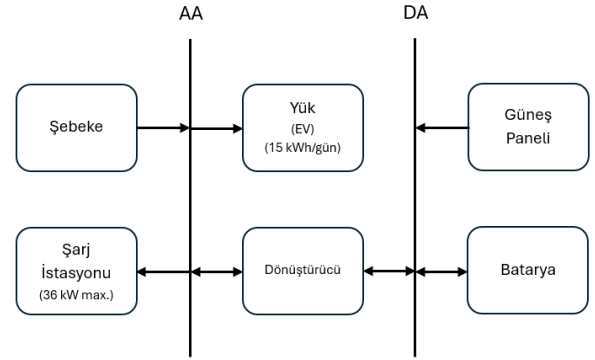
(b)

Şekil 3. Sistemlerin kurulacağı bölgenin yıllık güneşlenme süresi (a) Aylık ortalama (b) Saatlik

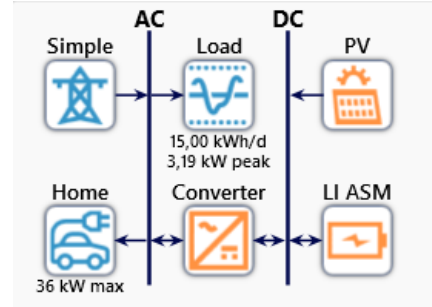
4.1 Senaryo 1 – AA Seviye 2 – 36 kW şarj istasyonu

AA seviye 2 – 36 kW şarj istasyonu kişisel bir şarj istasyonu olarak evde kullanılmak için tasarlanmıştır. Aynı anda 2 aracı şarj edebilmektedir. 90 m² alana kurulan 15 kW'lık kurulu güce sahip FV sistem de eklenerek tasarruf sağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Evdeki diğer yükler

günlük ortalama 15 kWh olarak belirlenmiştir. Bu senaryo için tasarlanan sistem şeması ve HOMERGrid blok şeması Şekil 4'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4. Senaryo 1–AA Seviye 2–36 kW şarj istasyonu şeması

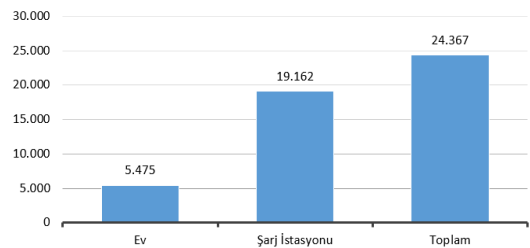
İki aracı şarj edebilen 36 kW'lık şarj istasyonunda şarj edilecek olan 2 aracın değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Senaryo 1'de şarj edilecek araçların özellikleri

Araç	Araç Sayısı	Araç Başına Maksimum Şarj Gücü (kW)	Araç Başına Gerekli Şarj Enerjisi (kWh)
BMW i3	1	7.7	12
Tesla Model 3	1	17.2	30

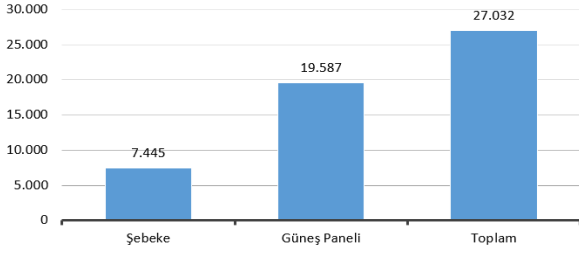
AA Seviye 2 şarj istasyonlarındaki şarj ortalama 6-8 saat sürmektedir. Yılda ortalama 24500 kWh tüketim olan bu sistemde 5500 kWh'lık kısmını yük, 19162 kWh'lık kısmını şarj istasyonu tüketmektedir (bkz. Şekil 5).

Senaryo 1 Yıllık Tüketim Oranları (kWh/Yıl)



Şekil 5. Senaryo 1'deki yıllık tüketim oranları

Senaryo 1 Yıllık Enerji Talebi Karşılama Oranları (kWh/Yıl)

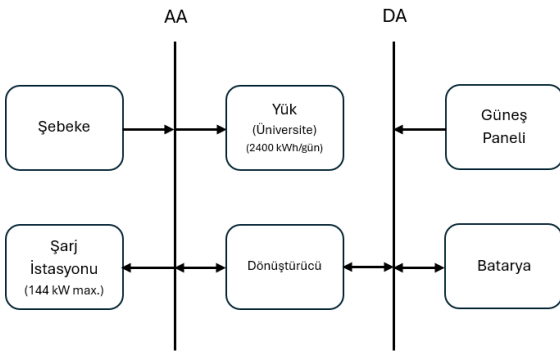


Şekil 6. Senaryo 1'deki yıllık enerji talebi karşılama oranları

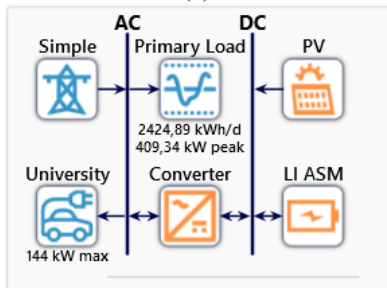
Gerekli olan enerjinin %72.5'lik kısmı güneş panellerinden karşılanmıştır (bkz. Şekil 6). FV sistem sayesinde şebekedeki enerji talebi azalmıştır ve elektrikli aracı şarj etmek için gerekli olan enerji de panellerden üretilmiştir.

4.2 Senaryo 2 – AA Seviye 2 – 144 kW şarj istasyonu

AA seviye 2 – 144 kW şarj istasyonu, üniversite-iş yeri gibi yerlerde kullanılması ön görülen şarj istasyonu olarak tasarlanmıştır. Her bir konnektör 18 kW gücünde ve aynı anda 8 aracı şarj etme kapasitesine sahiptir. 3000 m² alana toplam 500 kW'lık kurulu güce sahip FV sistem eklenerek tasarruf sağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Kurulacak olan yerdeki diğer yük talebi günlük ortalama 2400 kWh olarak belirlenmiştir. Bu senaryo için tasarlanan sistem şeması ve HOMERGrid blok şeması Şekil 7'de verilmiştir.



(a)



(b)

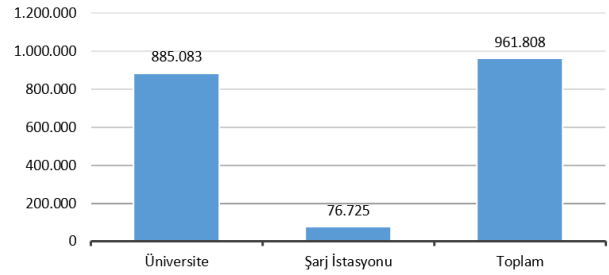
Şekil 7. Senaryo 2-AA Seviye 2-144 kW şarj istasyonu şeması

Aynı anda 8 aracı şarj edebilen 144 kW'lık şarj istasyonunda şarj olacak olan araçların güç değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu senaryo da 1. senaryodaki gibi AA 2. seviye şarj istasyonudur. Ortalama 6-8 saatte şarj edilmesi beklenmektedir. Bu iki istasyon arasındaki farklar, FV sistem farkı ve yük talebidir. Yılda ortalama 961 MWh tüketim olan bu sistemde 885 MWh'lık kısmını yük, 76 MWh'lık kısmını şarj istasyonu tüketmektedir (bkz. Şekil 8). Gerekli olan enerjinin %64.7'lik kısmı FV sistemden karşılanmıştır (bkz. Şekil 9). 1. şarj istasyonunda enerji tüketiminin %77.78'i şarj istasyonu tarafından yapılmaktadır. Bu sistemde ise diğer yüklerin fazla olması sebebiyle şarj istasyonunun tükettiği enerji sadece %7.98 seviyesinde kalmıştır. Eğer FV sistemin sadece şarj istasyonu ihtiyacını karşılaması istenirse 500kW'lık FV sistem yerine daha düşük güçte bir sistem kurulabilir. Bu sayede sistemin maliyeti düşürülebilir.

Tablo 4. Senaryo 2'de şarj edilecek araçların özellikleri

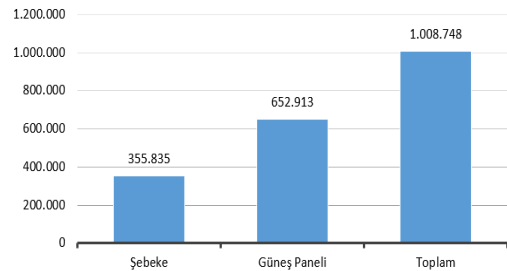
Araç	Araç Sayısı	Araç Başına Maksimum Şarj Gücü (kW)	Araç Başına Gerekli Şarj Enerjisi (kWh)
BMW i3	1	7.7	12
Tesla Model 3	3	17.2	30
Nissan Leaf	2	6.6	15
Tesla Model X	2	17.2	40

Senaryo 2 Yıllık Tüketim Oranları (kWh/Yıl)



Şekil 8. Senaryo 2'deki yıllık tüketim oranları

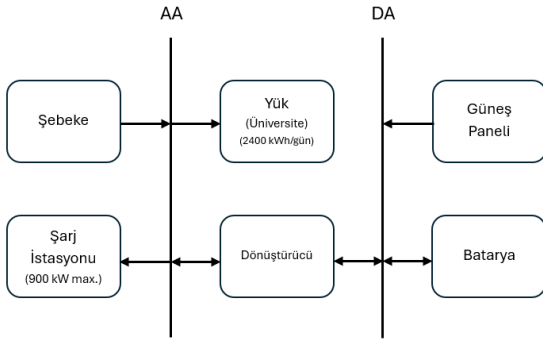
Senaryo 2 Yıllık Enerji Talebi Karşılama Oranları (kWh/Yıl)



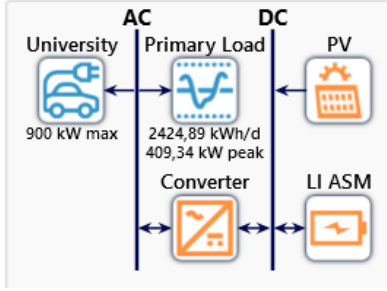
Şekil 9. Senaryo 2'deki yıllık enerji talebi karşılama oranları

4.3 Senaryo 3 – AA Seviye 3 – 900 kW hızlı şarj istasyonu

Üçüncü ve son senaryoda ise diğer istasyonlardan farklı olarak hızlı şarj istasyonu incelenmiştir. Bu şarj istasyonunun üniversite, alışveriş merkezi veya otoban gibi yerlerde kullanımı uygundur. Bu senaryo için tasarlanan sistem şeması ve HOMERGrid blok şeması Şekil 10'da verilmiştir. Her bir konnektör 150 kW gücünde ve aynı anda 6 aracı şarj etme kapasitesine sahiptir. 2. senaryoda olduğu gibi yine 3000 m² alana toplam 500 kW'lık FV sistem eklenerek tasarruf sağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Kurulacak olan yerdeki diğer yük talebi günlük ortalama 2400 kWh olarak belirlenmiştir.



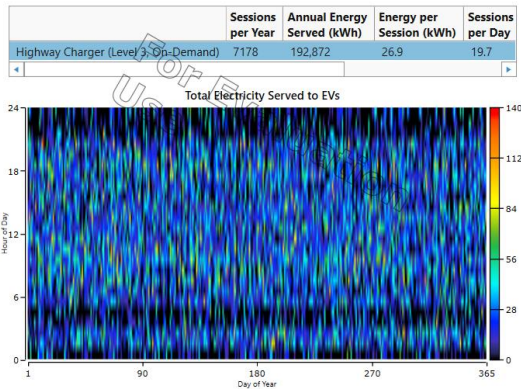
(a)



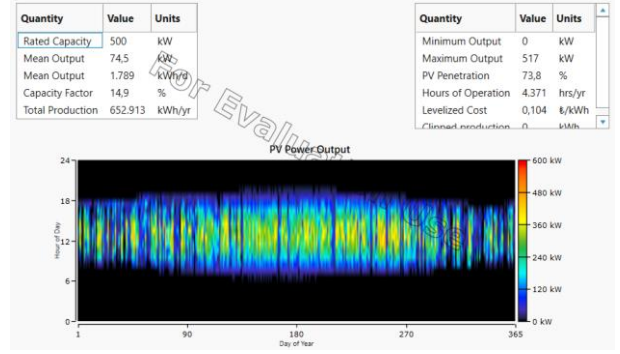
(b)

Şekil 10. Senaryo 3-AA Seviye 2-900 kW şarj istasyonu şeması

Senaryo 3 için HOMERGrid'ten elde edilen EA şarj istasyonu saatlik tüketim değişimi Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. EA Şarj istasyonu saatlik tüketim değişimi



Şekil 12. FV sistemin çıkış gücünün saatlik değişimi

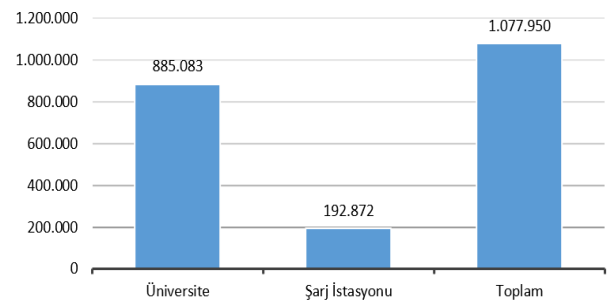
Şekil 12'de FV sistemin çıkış gücünün yıl boyunca saatlik değişimi verilmiştir. Aynı anda 6 aracı şarj edebilen 900 kW'lık şarj istasyonunda şarj olacak olan araçların güç değerleri girilmiştir (bkz. Tablo 5). Diğer istasyonlardan temel farkı hızlı şarj istasyonu olmasıdır ve yaklaşık 20-30 dakikada aracı şarj etmektedir.

Tablo 5. Senaryo 3'te şarj edilecek araçların özellikleri

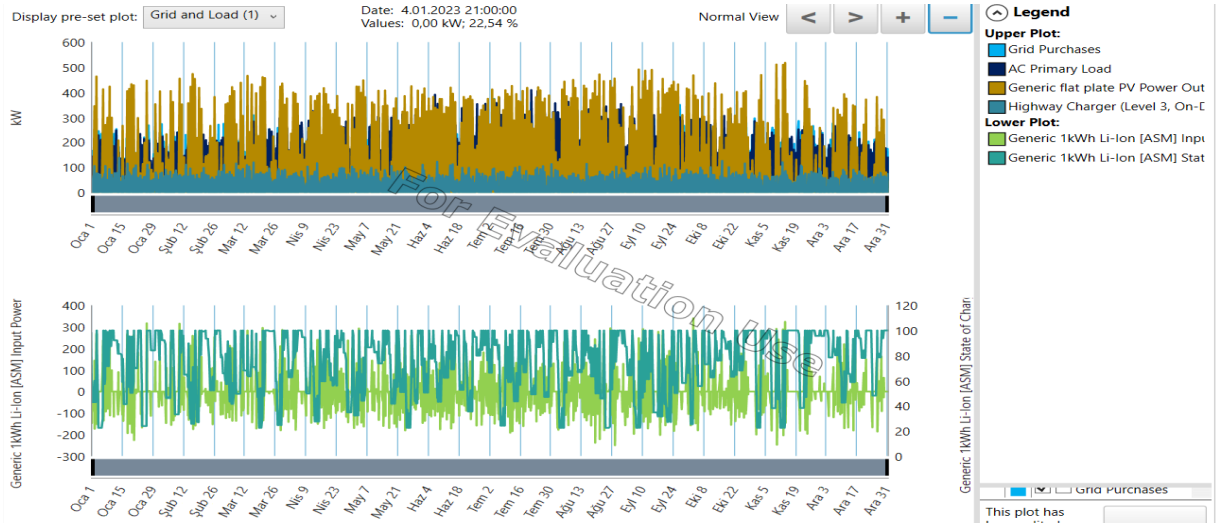
Araç	Araç Sayısı	Araç Başına Maksimum Şarj Gücü (kW)	Araç Başına Gereklili Şarj Enerjisi (kWh)
Büyük Araçlar	2	150	20
Küçük Araçlar	4	50	20

Senaryo 3 için 1 yıl boyunca anlık olarak şebekeden çekilen, lokal yük ve şarj istasyonu için harcanan ve FV sistemin ürettiği gücü gösteren grafik Şekil 13'te verilmiştir. Ayrıca Şeklin alt kısmında burada kullanılan bataryanın anlık şarj/deşarjını ve şarj durumunu (SoC) gösteren değişim verilmiştir. Değişimin daha net olarak görülebilmesi için 1 haftalık (29 Haziran-5 Temmuz) değişimi gösteren grafik ayrıca Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 15'te yük ve şarj istasyonu enerji ihtiyacının şebeke ve FV sistemden karşılanma oranının aylık değişimi gösterilmiştir.

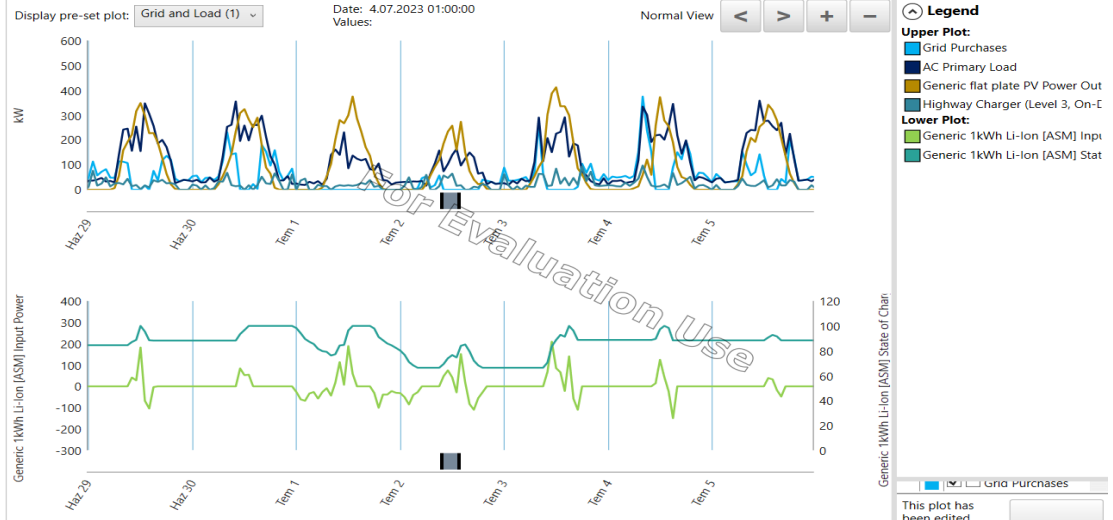
Senaryo 3 Yıllık Tüketim Oranları (kWh/Yıl)



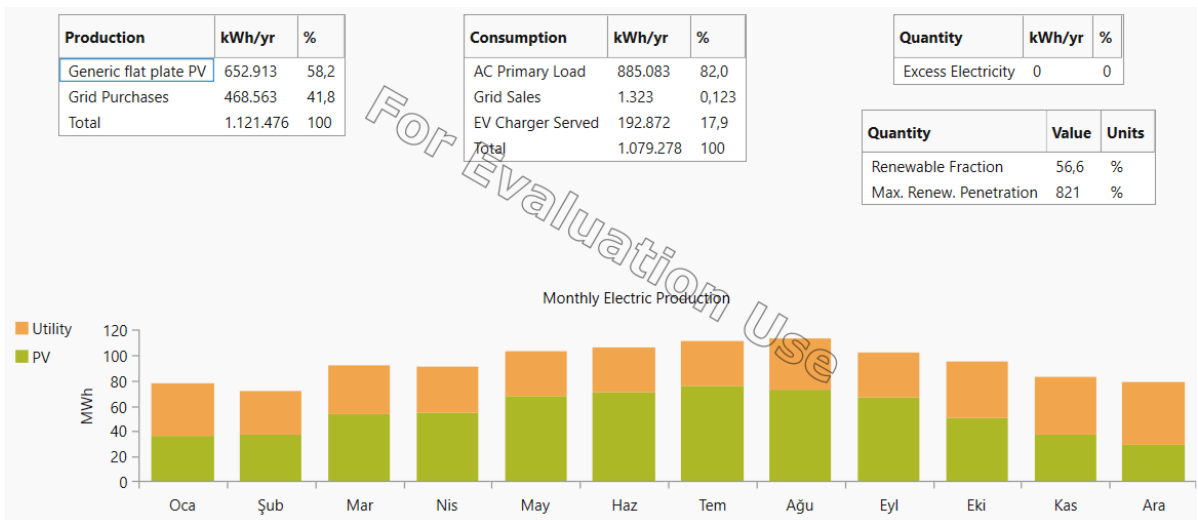
Şekil 16. Senaryo 3'teki yıllık tüketim oranları



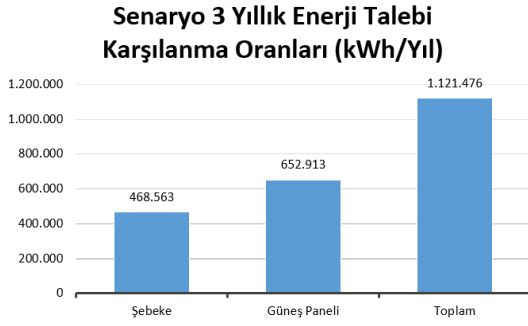
Şekil 13. Bir yıl boyunca şebekeden çekilen, lokal yük ve şarj istasyonu için harcanan ve FV sistemin ürettiği gücün anlık değişimi



Şekil 14. FV sistemin çıkış gücünün saatlik değişimi



Şekil 15. Enerji talebinin şebekeden ve FV sistemden karşılanma oranlarının aylık değişimi



Şekil 17. Senaryo 3'teki yıllık enerji talebi karşılama oranları

Yılda ortalama 1077 MWh tüketim olan bu sistemde 885 MWh'lık kısmını yük, 192 MWh'lık kısmını şarj istasyonu tüketmektedir (bkz. Şekil 16). Gerekli olan enerjinin %58.2'lik kısmı FV sistemden karşılanmıştır (bkz. Şekil 17).

5 Sonuçlar ve tartışma

FV güneş enerjisinin EA şarj sistemlerine entegre edilmesi giderek artan bir konudur. Bunun başlıca sebepleri; elektrikli araçların yaygınlaşması ve hızlı büyüyen bir sektör olması, sera gazlarının çevre üzerindeki etkisiyle mücadele etme ihtiyacı ve FV panellerin maliyetinde devam eden düşüştür. FV ile çalışan şarj sistemleri, şarj için FV üretiminin yetersizliği, elektrik şebekesine bağımlılığın devam etmesi FV destekli sistemlerini daha makul bir seçenek yapmaktadır. Bu çalışmada öncelikle dünya çapında önem arz eden konulardan birisi olan elektrikli şarj istasyonları incelenmiştir. Bunun ardından, şebekeye bağlı sistemlerde otopark bölgelerine ve binaya entegre FV'ye destekli bir EA şarj için farklı senaryolar kullanılmıştır. Böylelikle elektrikli araçlar için gerekli enerji kısmen FV üretimi tarafından sağlanan enerjiyle geri kalan kısmı şebekeden sağlanması, şarj edilecek araç olmadığı durumlarda FV'den elde edilen enerji, şebeke bağlantısıyla depolanmadan şebekeye aktarılması veya depolanması amaçlanmıştır.

HOMERGrid simulasyon programı aracılığıyla; 36 kW Şarj İstasyonu (AA Seviye 2), 144 kW Şarj İstasyonu (AA Seviye 2) ve 900 kW Hızlı Şarj İstasyonu (Seviye 3) şarj istasyonu için sırasıyla 90 m² alana kurulan 15 kW'lık kurulu güce sahip FV sistem, 3000 m² alana toplam 500 kW'lık ve yine 3000 m² alana toplam 500 kW'lık FV sistem eklenerek FV panellerin kurulum yerlerine göre şarj istasyonuna farklı güç oranlarında katkı sağladığı 3 farklı senaryo incelenmiştir. Bu üç farklı senaryoda şarj istasyonları için simülasyon yapılarak sistemlerdeki günlük yük profili, yıllık tüketim ve yük talebinin FV panel ve şebekeden alınma oranları ve şebekeye enerji aktarma miktarları gibi çıktılar elde edilmiştir. HOMERgrid'ten alınan sonuçlar senaryo-3 için verilmiştir, diğer senaryolar için alınan değerler tablo ve grafik olarak verilmiştir. Şarj istasyonlarını desteklemesi için sisteme FV paneller eklenmiştir. Aynı zamanda sisteme acil ihtiyaçlar için batarya eklenmiştir bu sayede üretilen fazla enerjinin depolanması sağlanmıştır. İstenilen durumlara göre şebekeye satılacak enerji miktarı, batarya boyutu, FV panel

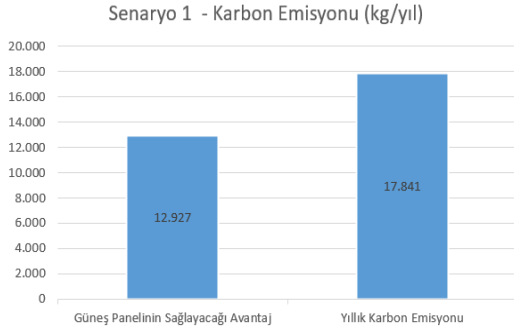
güç değerleri değiştirilebilir. Kurulan bu sistemler ortalama 6-7 yılda yatırım maliyetini amorti ettikten sonra hem diğer yüklerde hem de şarj istasyonlarında çok büyük katma değer yaratacaktır. Ayrıca CO₂ emisyonu dünyanın en önemli sorunlarından biri halinde ve elektrikli araçların yaygınlaştığı bu dönemlerde şarj istasyonlarını FV panellerle destekleme karbon emisyonunu azaltmak için bir fayda sağlamaktadır. Tablo 6'da üç farklı senaryoyu özetlemekte ve elde edilen sonuçları özetlemektedir.

Tablo 6. Tüm senaryolar için sistemin özeti ve sonuçları

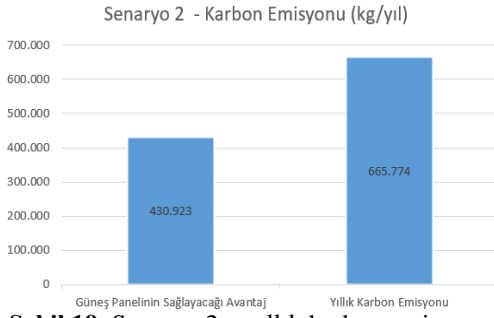
	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Batarya (kWh)	1	1	1
Lokal Yük (kWh)	15	2400	2400
EA şarj istasyonu kurulu gücü (kW)	36	144	900
FV Sistem kurulu gücü (kW)	15	500	500
Ev / Üniversite (kWh/yıl)	5.475	885.083	885.083
EA Şarj istasyonu tüketimi (kWh/yıl)	19.162	76.725	192.872
FV sistemden sağlanan enerji (kWh/yıl)	19.587	652.913	652.913
Şebekeden çekilen enerji (kWh/yıl)	7.445	355.835	468.563
Şebekeden satılan enerji (kWh/yıl)	438	3.665	1.323
FV sistemden faydalanma oranı	%62.1	%63.1	%56
Karbon Emisyonu azaltımı (kg/yıl)	12.927	430.923	430.923

Bu sonuçlara göre 3 senaryo için de yaklaşık aynı oranda yenilenebilir enerjide faydalanılmış ve şebekeye enerji satma minimumunda kalmıştır. Üç durumda da enerjinin büyük oranda üretildiği yerde kullanıldığı görülmektedir. Batarya kapasitesi maliyet yükünü artırmamak ve şebeke bağlı bir sistem olduğu için minimumda tutulmuştur.

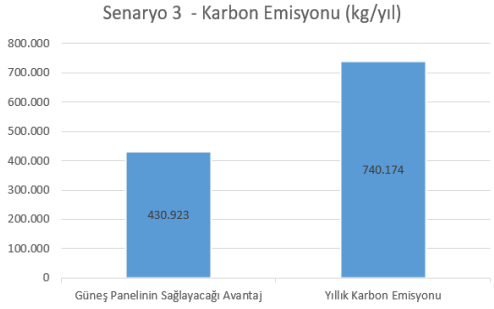
Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de 3 senaryonun yıllık karbon emisyonları ve güneş panellerinin sağlayacağı katkılar verilmiştir. Senaryo 1 için yıllık yaklaşık 13 ton, Senaryo 2 ve Senaryo 3 için yaklaşık 430 ton CO₂ emisyonunu azaltabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 18. Senaryo 1 – yıllık karbon emisyonu



Şekil 19. Senaryo 2 – yıllık karbon emisyonu



Şekil 20. Senaryo 3 – yıllık karbon emisyonu

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] M. Umair, N.M. Hidayat, A. S. Ahmad, N.H.N. Ali, M.I.M. Mawardi and E. Abdullah, A renewable approach to electric vehicle charging through solar energy storage. PLOS One 19 (2), 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297376>.
- [2] A. J. Alrubaie, M. Salem, K. Yahya, M. Mohamed and M. Kamarol, A comprehensive review of electric vehicle charging stations with solar photovoltaic system considering market, technical requirements, network implications, and future challenges. Sustainability, 15 (10), 8122, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15108122>.
- [3] B. Ye, J. Jiang, L. Miao, P. Yang, J. Li, B. Shen, Feasibility study of a solar-powered electric vehicle

charging station model. Energies, 8, 13265-13283, 2015. <https://doi.org/10.3390/en81112368>.

- [4] S. C. Mohamad, M. Sechilariu, F. Locment, Y. Krim, Pv-powered electric vehicle charging stations: preliminary requirements and feasibility Conditions. Applied Sciences, 11, 1770, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11041770>.
- [5] T. H. Shah, A. Shabbir, A. Waqas, A. K. Janjua, N. Shahzad, H. Pervaiz and S. Shakir, Techno-economic appraisal of electric vehicle charging stations integrated with on-grid photovoltaics on existing fuel stations: a multicity study framework. Renewable Energy, 209, 133–144, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.03.128>.
- [6] R. Redwan, M. Hasan, A. Nadia, M. S. Khan, N. A. Chowdhury and N. U. R. Chowdhury, Design analysis and techno-economic assessment of a photovoltaic-fed electric vehicle charging station at Dhaka-Mawa expressway in Bangladesh. Energy Conversion and Management: X, 24, 100737, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2024.100737>.
- [7] M. Razeghi, A. R. Araghi, A. Naseri, and H. Yousefi, Strategic deployment of GIS-optimized solar charging stations for electric vehicles: a multi-criteria decision-making approach. Energy Conversion and Management: X, 24, 100712, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100712>.
- [8] M. Terkeş and A. Demirci, Feasibility analysis of solar-powered electric vehicle charging stations considering demand profiles. International Journal of Research and Analytical Reviews, 10 (3), 906-917, 2023.
- [9] M. H. Ghodusinejad, Y. Noorollahi and R. Zahedi, Optimal site selection and sizing of solar EV charge stations. Journal of Energy Storage, 56, 105904, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105904>.
- [10] A. Dik, A. Omer and R. Boukhanouf, Investigation of cost-effective electric vehicle charging station assisted by photovoltaic solar energy system. Transportation Research procedia, 70, 423-432, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.048>.
- [11] D. Gogoi, A. Bharatee and P. K. Ray, Implementation of battery storage system in a solar PV-based EV charging station. Electric Power Systems Research, 229, 110113, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110113>.
- [12] R. Fachrizal, K. Qian, O. Lindberg, M. Shepero, R. Adam, J. Widén and J. Munkhammar, Urban-scale energy matching optimization with smart EV charging and V2G in a net-zero energy city powered by wind and solar energy. eTransportation, 20, 100314, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100314>.
- [13] M. G. F. Savari, M. J. Sathik, L. A. Raman, E. A. Adel, H. M. Hasanien, D. Almakhles, H. E. A. A. Shady and A. I. Omar, Assessment of charging technologies, infrastructure and charging station recommendation schemes of electric vehicles: A review. Ain Shams Engineering Journal, 14 (4), 101938, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101938>.

[14] H. Tu, H. Feng, S. Srdic and S. Lukic, Extreme fast charging of electric vehicles: a technology overview. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5 (4), 861-878, 2019. <https://doi:10.1109/TTE.2019.2958709>.

[15] M. R. Khalid, I. A. Khan, S. Hameed, M. S. J. Asghar and J.-S. Ro, A Comprehensive review on structural topologies, power levels, energy storage systems, and standards for electric vehicle charging stations and their impacts on grid. *IEEE Access*, 9, 128069- 128094, 2021. <https://doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112189>.





Tracking seasonal coastal dynamics of Ağyatan wetland using object-based Classification and Regression Tree

Nesne tabanlı Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı kullanılarak Ağyatan sulak alanının mevsimsel kıyı dinamiklerinin izlenmesi

Mustafa Hayri Kesikoğlu¹, Tolga Kaynak^{2,*}

¹ Uşak University, Civil Engineering Department, 64000, Uşak, Türkiye

¹ Uşak University, Urban and Regional Planning Department, 64000, Uşak, Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir University, Geomatics Engineering Department, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

In recent years, the management of water and wetlands has become increasingly important. Ağyatan Wetland is a natural lake formed by the Ceyhan River, located west of the river. The area around the wetland is home to various sea and land creatures, as well as endemic plants and endangered birds. This study aimed to analyze the seasonal changes occurring in the Ağyatan wetland in 2016. Landsat 8 images from four seasons of 2016 were utilized to identify these changes. The study areas were classified into six categories: lake, sea, cultivated agricultural land, barren land, building area, and water channel. Thematic maps for the four seasons were generated using the object-based Classification and Regression Tree (CART) method. Additionally, change detection analyses were conducted using the post-classification comparison method. The study revealed a decrease in the lake area from winter to spring (0.8919%), followed by an increase from spring to summer (0.3627%) and summer to autumn (0.1953%) in 2016. This fluctuation was attributed to groundwater, river water, and melting snow.

Keywords: Change detection, Object-based classification, CART, Wetland, Landsat 8

1 Introduction

Recently, remote sensing has become one of the most preferable disciplines to conduct land use/land cover detection, wetland management, ecological studies, and monitoring of deformations. Images obtained by remote sensing discipline produce useful results with the classification process. There are two commonly utilized classification approaches namely object-based and pixel-based classifications. Pixel-based classification is made by using the spectral information of each pixel. However, pixel groups are used in the object-based classification method. Object-based classification is used as an alternative to the pixel-based classification method. In object-based classifications, some properties such as size, shape, and texture of pixel groups are examined and the analysis is based on these segments. Also, properties such as location

Öz

Son yıllarda su ve sulak alanların yönetimi giderek önem kazanmıştır. Ağyatan Sulak Alanı, Ceyhan Nehri'nin batısında yer alan doğal bir göldür. Sulak alan çevresi çeşitli deniz ve kara canlılarına, endemik bitkilere ve nesli tükenmekte olan kuşlara ev sahipliği yapmaktadır. Bu çalışmada, 2016 yılında Ağyatan Sulak Alanı'nda meydana gelen mevsimsel değişimlerin analizi amaçlanmıştır. Bu değişimlerin belirlenmesi için 2016 yılının dört farklı mevsimine ait Landsat 8 görüntüleri kullanılmıştır. Çalışma alanları göl, deniz, ekili tarım arazisi, çıplak alan, yapı alanı ve su kanalı olmak üzere altı kategoriye ayrılmıştır. Dört mevsime ait tematik haritalar, nesne tabanlı Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (CART) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, sınıflandırma sonrası karşılaştırma yöntemi kullanılarak değişim tespiti analizleri yapılmıştır. Çalışmada, 2016 yılında göl alanında kıştan ilkbahara doğru (0.8919%) bir azalma, ardından ilkbahardan yaz (0.3627%) ve yazdan sonbahara (0.1953%) doğru bir artış olduğu ortaya konulmuştur. Bu dalgalanmanın yeraltı suyuna, nehir suyuna ve eriyen karlara bağlandığı belirtilmiştir.

Anahtar kelimeler: Değişim belirleme, Nesne tabanlı sınıflandırma, CART, Sulak alan, Landsat 8

and coexistence are questioned in object-based classifications [1]. In the literature, there are some studies about the comparison of object-based and pixel-based classification. Gholoobi et al. [2] performed pixel-based and object-based classification to determine land use/land cover in mountainous regions, and object-based classification gave more accurate results. Kalkan and Maktav [3] compared pixel-based and object-based classification on a 2x2 km area. Erdas software for pixel-based classification and eCognition software for object-based classification were used. Classification results were different from each other and object-based classification had also high accuracy. Therefore, the object-based classification method was used to provide high accuracy in classification. Recent studies have generally focused on highlighting the strengths and weaknesses of each approach in various applications. A notable study by Wang, (2023) [4] examined land use and

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tolgakaynak@ohu.edu.tr (T. Kaynak)

Geliş / Received: 01.10.2024 Kabul / Accepted: 24.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1559034

land cover (LULC) changes in a subtropical region of South Africa, comparing the accuracy of pixel-based and object-based classification methods. The findings revealed that object-oriented classification consistently outperformed pixel-based methods. The study underscores the effectiveness of object-based approaches in capturing complex land cover features that pixel-based methods may overlook. Similarly, Aghababaei et al. (2021) [5] assessed the classification of plant ecological units in heterogeneous semi-steppe rangelands using Minimum Distance, Maximum Likelihood (ML), Artificial Neural Network (ANN)-Multi Layer Perceptron, and Classification Tree (CT) methods to compare pixel-based and object-based methods. The object-based CT method yielded superior accuracy in complex landscapes. The study emphasized that the spatial context provided by object-based methods allows for a more nuanced understanding of land cover types, which is particularly beneficial in heterogeneous environments. In another study, Turissa et al. (2021) [6] evaluated change detection methods for seagrass beds, highlighting the limitations of pixel-based ML classification, which primarily relies on spectral information. In contrast, it was indicated that the object-based image analysis (OBIA) method incorporates spatial dimensions through image segmentation, resulting in improved classification accuracy. Tonyaloğlu et al. (2021) [7] confirmed that object-based classification methods provide a more coherent representation of land cover types, particularly in high-resolution satellite imagery. Qu et al. (2021) [8] also contributed to this discourse by exploring the accuracy improvements in LULC classification through the use of auxiliary datasets in both pixel-based and object-based methods. They found that while pixel-based classification has been the focus of much previous research, object-based approaches are gaining traction due to their ability to integrate additional contextual information, leading to enhanced classification outcomes.

The coastline represents the boundary between land and water, but it becomes undefined in certain situations, such as during floods. The coastline can occasionally change due to seasonal events. Coastal research is a significant component in some areas such as coastal protection, wetland management, sea-level rise monitoring, land subsidence, and erosion-sedimentation [9]. Wetlands and wetland management are significant topics for remote sensing studies. In the literature, there are some studies about wetlands. Modi et al. [10] observed changes in the Kosi River affected by a flood. They detected land use/land cover changes using object-based classification and analyzed the flood in the wetland. Badjana et al. [11] determined land cover changes in the Binah River Basin using object-based classification of Landsat images. They also created land use maps. Sánchez-García et al. [12] observed coastal changes in the Gulf of Valencia by using four high-precision shoreline data and eleven Landsat images from 2006 to 2010 and achieved high accuracy. Recent studies have explored various machine learning algorithms for wetland classification, demonstrating the effectiveness of different approaches in accurately identifying and mapping these

critical ecosystems. Lin et al. (2023) [13] utilized semantic segmentation techniques based on Sentinel-2 imagery, showcasing the advantages of machine learning algorithms over traditional classification methods in coastal wetland mapping. Similarly, Gonzalez-Perez et al. (2022) [14] employed deep learning and machine learning techniques on multispectral images obtained from unpiloted aircraft systems, highlighting the potential of these methods for detailed wetland vegetation mapping. In another study, Zhou et al. (2021) [15] implemented OBIA combined with machine learning algorithms to classify wetland vegetation, demonstrating the efficacy of this approach in handling complex data structures. Moreover, Adeli et al. (2021) [16] focused on the application of synthetic aperture radar (SAR) data in conjunction with machine learning techniques for wetland inventory mapping, emphasizing the robustness of these algorithms in delineating herbaceous wetland classes. Kesikoglu et al. (2019) [17] compared the performance of ANN, SVM, and ML algorithms for land use / cover change mapping in wetland areas, underlining the success of support vector machine (SVM). Similarly, Festus et al. (2020) [18] compared the performance of k-nearest neighbors (K-NN) and SVM algorithms in urban wetland classification, revealing the strengths of each method in different contexts. Çiftçi et al. (2024) [19] analyzed the impacts of land use and climate change on the Sugla water storage area in Turkey, emphasizing the importance of accurate land cover classification to capture the dynamic changes in wetland environments accurately.

One prominent approach is using a Classification and Regression Tree (CART) algorithm. The study by Feng et al. (2021) [20] highlighted the computational efficiency of CART, although it primarily focused on other classification methods and their applications in wetland distribution. Simioni et al. (2020) [21] compared CART with artificial neural networks (ANN) for detecting inland marshes, highlighting its reliability in wetland mapping. Similarly, Mahdianpari et al. (2020) [22] utilized CART with Google Earth Engine to create a high-resolution wetland inventory map, showcasing its capability to handle large datasets effectively. In another study, Gxokwe et al. (2022) [23] leveraged CART within the Google Earth Engine platform to characterize small seasonal wetlands, emphasizing its utility in semi-arid environments. These studies collectively underscore the versatility and effectiveness of the CART method in various wetland classification contexts, particularly when integrated with advanced remote sensing technologies. All the studies in the literature show that object-based classification methods and also the CART algorithm give successful classification results.

This study aims to perform object-based image classification with the CART method on the Ağyatan wetland area and also to compare the coastline changes of the wetland area in Adana, Turkey with the analysis of Landsat 8 Landsat Data Continuity Mission (LDCM) imagery.

2 Material and methods

2.1 Study area

Ağyatan wetland area is located in the Eastern Mediterranean Basin and near the Karatas, Adana [24]. It is located between land and sea as shown in Figure 1. Therefore, the lake can be influenced by factors of both terrestrial and marine ecosystem.

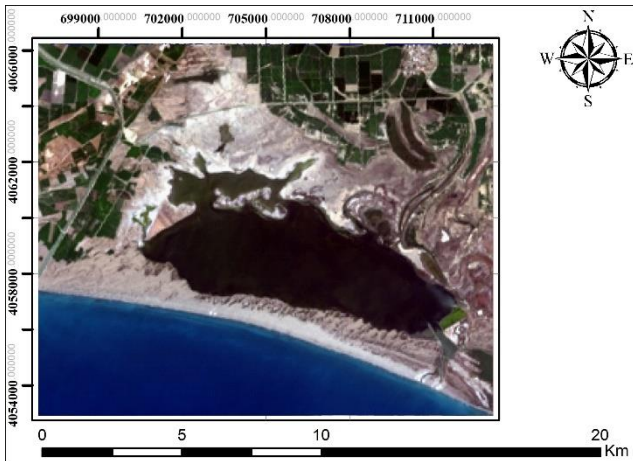


Figure 1. Landsat 8 LDCM image on February 2016 of the Ağyatan wetland area

The wetland area is the crossroads of migratory birds' migration routes. Different bird species live in the Ağyatan wetland area. There are also some endangered plants in this region [25]. For this reason, the Ağyatan wetland area is significant for natural life. The protection of the wetland is necessary not only for the maintenance of natural life but also for the sustainability of economic activities such as agriculture, fishing and tourism. Furthermore, the limited number of comprehensive studies in literature such as seasonal LULC or coastal dynamics analysis addressing the Ağyatan wetland makes this study even more meaningful. Therefore, following the seasonal changes in the wetland is very important.

2.2 Material

Four Landsat 8 Operational Land Imageries (OLI) having 30-meter spatial resolution are used to determine seasonal land use/cover classes in the study area for 2016 (Table 1). The Landsat 8 image used in the study was provided by United States Geological Survey (USGS) website [26]. Table 1 provides a detailed overview of the Landsat 8 bands, including their wavelengths and resolution values.

Table 1. Landsat 8 imagery image acquisition dates, cloud cover percentage and scene identifier

Date acquired	Landsat scene identifier	Cloud cover
26/02/2016	LC81750352016057LGN01	0.62
16/05/2016	LC81750342016137LGN01	2.91
20/08/2016	LC81750342016233LGN01	1.18
24/11/2016	LC81750352016329LGN02	0.27

Table 2. Landsat 8 bands and their wavelength and resolution [27]

Band	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band-1 Ultra Blue (Coastal Aerosol)	0.43-0.45	30
Band-2 Blue	0.45-0.51	30
Band-3 Green	0.53-0.59	30
Band-4 Red	0.64-0.67	30
Band-5 Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	30
Band-6 Shortwave Infrared (SWIR-1)	1.57-1.65	30
Band-7 Shortwave Infrared (SWIR-2)	2.11-2.29	30
Band-8 Panchromatic	0.50-0.68	15
9 Cirrus	1.36-1.38	30
Band-10 Thermal Infrared (TIRS-1)	10.60-11.19	100*30
Band-11 Thermal Infrared (TIRS-2)	11.50-12.51	100*30

2.3 Methods

The classification of the satellite image of the Ağyatan wetland and the change detection analysis are the two main steps of this research. The classification step consists of geometric correction (image recording), multiresolution segmentation and classification. Change detection analysis was done using the post-classification comparison method. Geometric correction and change detection analysis were performed in ENVI software, while multi-resolution segmentation and classification stages were performed in eCognition software.

2.3.1 Geometric correction

Geometric correction is the process of putting the image on a geographic coordinate system defined using ground control points. This operation aims to eliminate the effect of geometric distortion in a raw image [28].

2.3.2 Multiresolution segmentation

The multiresolution segmentation algorithm is a joining technique that is upward from below. Individual pixels aggregate into increasingly larger segments at multiple levels. It is a recursive process according to three parameters: scale, shape, and compactness [29]. This method defines single-image objects and combines pixels with neighbors according to the homogeneity criterion. These homogeneous criteria are a combination of spectral and shape measures.

2.3.3 Classification and Regression Tree

Classification and Regression Tree (CART) is a machine learning algorithm based on decision trees. This algorithm creates a tree structure that divides data according to its features and predicts the results with successive decisions (Figure 2). In this tree structure, the root node at the top represents the entire population, and each internal node represents data samples separated according to the values of the features. The subset creation process is repeated until a certain depth or a predetermined stopping criterion is reached [30]. While performing this process, the Gini index given in Equation (1) is used to determine each split point.

After this stage, the leaf nodes that make the final decision are obtained.

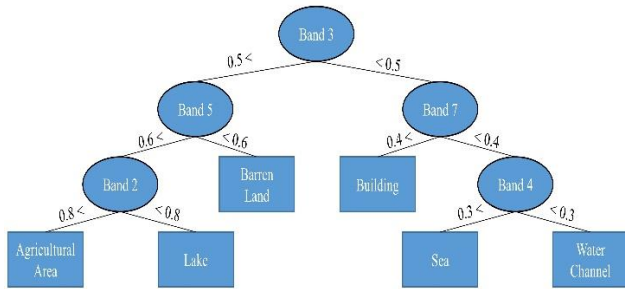


Figure 2. An example of a CART decision chart

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2 \quad (1)$$

Where p_i represents the probability of the node splitting for the i number of classes and c represents the number of classes. The minimum of $g(t)$ values calculated separately for the threshold values consisting of the values of the initial feature is accepted as the threshold value for that feature and this process is repeated for the other features.

2.3.4 Accuracy assessment and change detection

The evaluation of the accuracy of classified images is conducted to assess the quality of the information obtained from the data [28]. For assessing the accuracy of land cover maps derived from satellite imagery, the stratified random sampling technique was applied to represent the various land cover classes in the region.

The fundamental logic in change detection analysis involves finding corresponding locations in two or more satellite images of the same geographical area and identifying dissimilar areas. Numerous approaches are utilized to detect change [31,32]. The change in the Ağyatan wetland area is obtained using the post-classification comparison method in this study. In employing this approach, it becomes feasible to precisely delineate both the specific land cover categories in which alterations take place and the corresponding magnitudes of these changes [33, 34].

3 Results and discussion

As part of the study, accurate, reliable, and expeditiously informative Landsat 8 satellite images representing four distinct seasons were employed as input data. The CART method was utilized to establish the delineation of lake area boundaries corresponding to each of these datasets. Benefiting from its marked sensitivity to spectral reflection values, this method has facilitated the extraction of intricate object details, yielding successful outcomes. The comprehensive methodology employed in this study is presented in Figure 3.

In this study, Landsat images were georeferenced to the Universal Transverse Mercator (UTM) projection system for images one-to-one overlap.

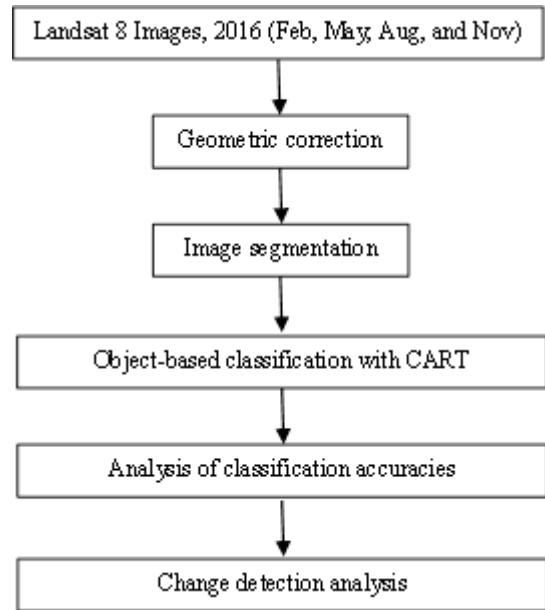


Figure 3. Flowchart of the study

For the geometric correction process, 48 Ground Control Points (GCP) distributed homogeneously over the images were used. The nearest neighbor resampling method was used for image rectification. The Root Mean Square Error (RMSE) for February, May, August, and November images were obtained 0.22, 0.19, 0.24, and 0.27 pixels, respectively.

In the first step, images were cropped to detect the study area, and multiresolution segmentation was performed on the study area images. Segmentation is a very critical stage in the process of creating a specific thematic map. This stage enables us to define each class by bringing together similar features in the image. Chessboard, one of the segmentation types, leads to loss of information in heterogeneous regions due to fixed-sized square cells. Although Quadtree is more flexible than the chessboard method, it prevents the accurate modeling of natural patterns because the shape of the objects is only square. In contrast, the multiresolution segmentation combines spectral and spatial features by the homogeneity criteria, thereby creating more natural boundaries and objects. This is a critical advantage for increasing the accuracy of LULC maps and provides a fundamental justification for the selection of our method. In this context, the selection of shape, scale and compactness parameters of the multiresolution method has a significant effect on the success of the classification.

The scale parameter determines the size of the objects. A smaller scale creates smaller and more detailed objects, while a larger scale creates larger and less detailed objects. To increase the accuracy of the resulting maps, a range of scale values between 10 and 500 were tried during segmentation and it was decided to use a scale value of 100 in the study. This value provided sufficient separation of the terrain classes, while at the same time not creating overly divided objects. The shape parameter determines the balance between colour and shape features. A low shape value gives more weight to colour information. Therefore, since the spectral differences between classes may be small, it was

found that spectral features should be emphasized by using lower shape values. In this case, the shape parameter was selected as 0.1. The compactness parameter controls how compact (smooth) the objects will be. Lower compactness values lead to more irregular, natural boundaries; higher compactness values lead to smooth, compact object formation. Therefore, the compactness value was taken as 0.5 in the study. The resulting segmentation images for February, May, August and November are presented in Figures 4-7, respectively.

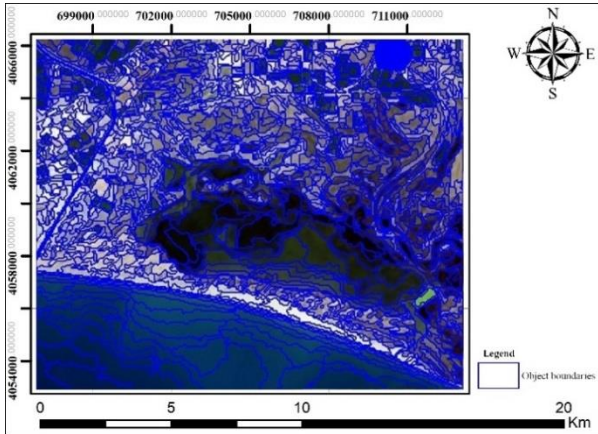


Figure 4. February segmentation image

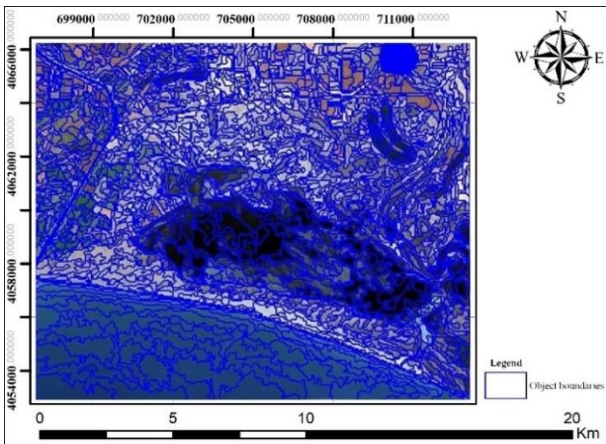


Figure 5. May segmentation image

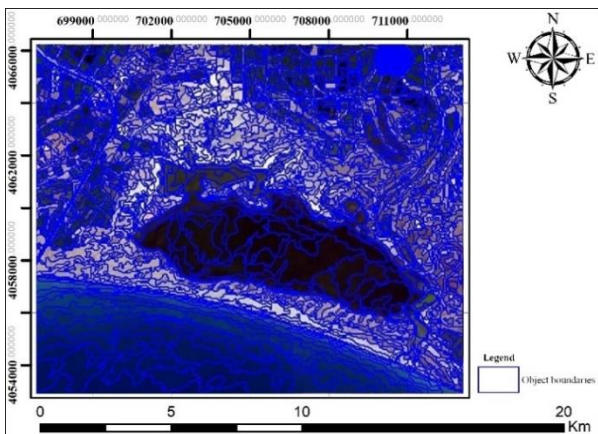


Figure 6. August segmentation image

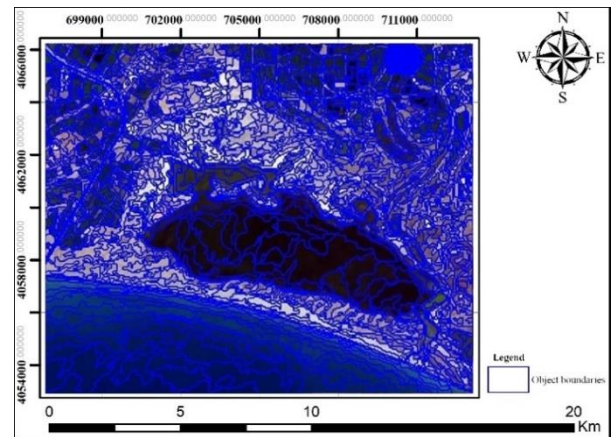


Figure 7. November segmentation image

In the second step, image classification was done by using the CART method. To carry out this process, objects containing approximately 7,000 pixels in total were selected for the classes of lake, sea, cultivated agricultural area, barren land, building area, and water channel. The number of pixels of each class was determined according to its percentage in the total area. Furthermore, the Google Earth platform was employed during the selection process.

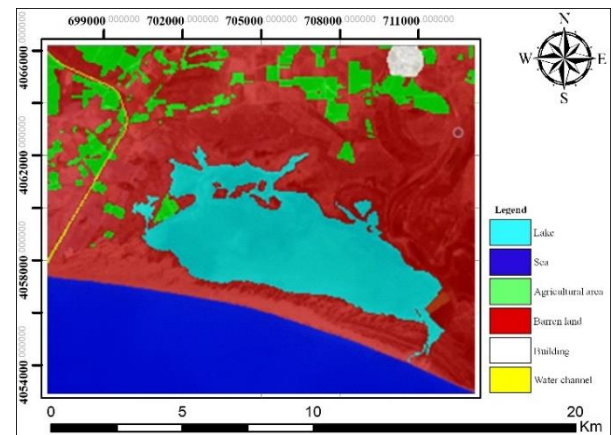


Figure 8. February segmentation image

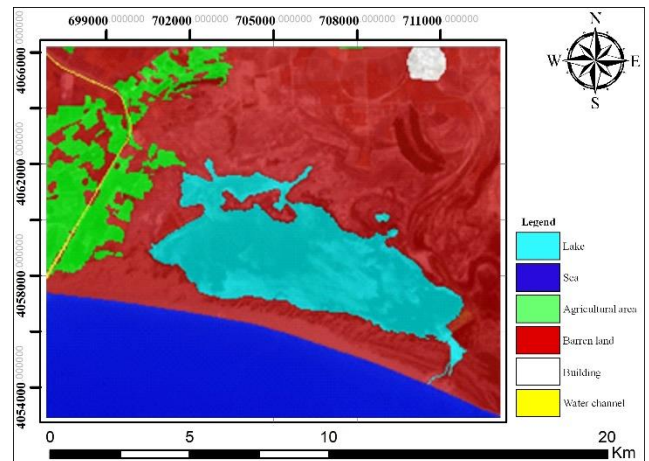


Figure 9. May segmentation image

The selected objects containing approximately 4,900 pixels were used in the training phase of the CART method. Additionally, spectral features (mean and brightness), indices (NDWI, NDVI and) and geometric features (elliptic fit, rectangular fit and roundness) were also selected during the classification phase. The study areas were classified into 6 classes: lake, sea, cultivated agricultural area, barren land, building area, and water channel. Thematic maps of four images were obtained as a result of the classification (Figure 8-11).

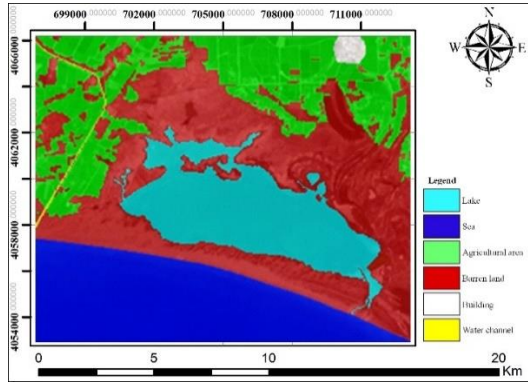


Figure 10. August segmentation image

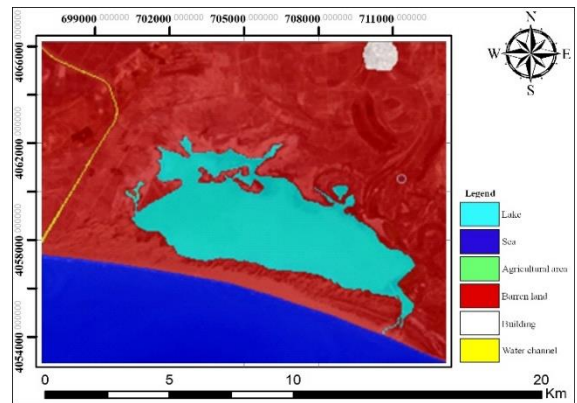


Figure 11. November segmentation image

In the third step, confusion matrices were created by overlapping the objects containing approximately 2100 pixels separated as test data with the classified images. These matrices were given for February, May, August and November, respectively (Table 3-6).

Table 3. Confusion matrix of February

	C1	C2	C3	C4	C5	C6		User (%)
Water channel (C1)	169	0	0	0	0	0	169	100
Building (C2)	0	242	0	0	0	0	242	100
Sea (C3)	0	0	305	0	0	0	305	100
Lake (C4)	0	0	0	341	7	0	348	98
Barren land (C5)	0	0	0	0	481	21	502	96
Agricultural (C6)	0	0	0	0	41	447	488	92
Producer (%)	169	242	305	341	529	468	2054	
Overall accuracy (%)	100	100	100	100	91	96		96.64

Table 4. Confusion matrix of May

	C1	C2	C3	C4	C5	C6		User (%)
Water channel (C1)	169	0	0	0	0	0	169	100
Building (C2)	0	242	0	0	0	0	242	100
Sea (C3)	0	0	289	0	0	0	289	100
Lake (C4)	0	0	0	313	0	0	313	100
Barren land (C5)	0	0	0	0	530	0	530	100
Agricultural (C6)	0	0	0	0	33	544	577	94
Producer (%)	169	242	289	313	563	544	2120	
Overall accuracy (%)	100	100	100	100	94	100		98.44

Table 5. Confusion matrix of August

	C1	C2	C3	C4	C5	C6		User (%)
Water channel (C1)	169	0	0	0	0	0	169	100
Building (C2)	0	242	0	0	0	0	242	100
Sea (C3)	0	0	276	0	0	0	276	100
Lake (C4)	0	0	5	314	0	0	319	98
Barren land (C5)	0	0	0	0	558	36	594	94
Agricultural (C6)	0	0	0	0	21	565	586	96
Producer (%)	169	242	281	314	579	601	2186	
Overall accuracy (%)	100	100	98	100	96	94		97.16

Table 6. Confusion matrix of November

	C1	C2	C3	C4	C5		User (%)
Water channel (C1)	169	0	0	0	0	169	100
Building (C2)	0	242	0	0	0	242	100
Sea (C3)	0	0	338	0	33	371	91
Lake (C4)	0	0	0	283	0	283	100
Barren land (C5)	0	0	0	0	965	965	100
Producer (%)	169	242	338	283	998	2030	
Overall accuracy (%)	100	100	100	100	97		98.37

When Table 3-6 is examined, it is seen that the classification accuracies are over 95%. Thus, it is understood that the classifications have high accuracies.

In the fourth step, the change in the Ağyatan wetland is acquired using the post-classification comparison method. According to these analyses, a decrease from the winter season to the spring, an increase from spring to summer, and summer to autumn were detected in the lake area. Changes which were a 0.8919% decrease from February to May, a 0.3627% increase from May to August, and a 0.1953% increase from August to November were determined. It has been determined that lake areas obtained from four distinct images exhibit varying responses to seasonal changes.

According to the World Meteorological Organization (WMO), 2016 was one of the hottest years on record, and this particularly affected water resources and wetland ecosystems. Due to the effects of El Niño events, extreme drought was observed in some regions and heavy rainfall was observed in some regions. This anomaly caused significant changes in the water level and ecosystem dynamics of wetlands. Therefore, seasonal changes in the study area in 2016 were monitored. To investigate the underlying reasons for seasonal changes, the temperature and precipitation values of the region were examined. Mediterranean region's annual precipitation belonging to Karatas/Adana is shown in Figure 12. According to the graphic, precipitation is approximately 87 mm in February, 49 mm in May, 6 mm in August, and 65 mm in November. It is seen that the temperature data is inversely proportional to the precipitation data in Figure 12. High rainfall increases the amount of water feeding the lake and causes the lake area to expand. High temperatures argue the opposite. In addition, the observed high temperatures increase evaporation rates, which in turn causes the lake area to decrease. These situations explain why the study area reaches its maximum area in February, the lake area decreases from winter to spring and the lake area increases from summer to autumn.

The coastline does not only change with precipitation, temperature and evaporation factors, but can also change with irrigation and natural factors. Spring is a period when irrigation activities are intensified because it is the planting and growing season. While spring irrigation activities consume more groundwater, in summer months, the sources that feed the lake may have recovered. In addition, the water holding capacity of the soil may be full in spring due to heavy precipitation and low temperatures. For this reason, some of the water may slowly leak into the lake in early summer,

causing the lake level to rise. The increase in lake area from spring to summer is related to these situations.

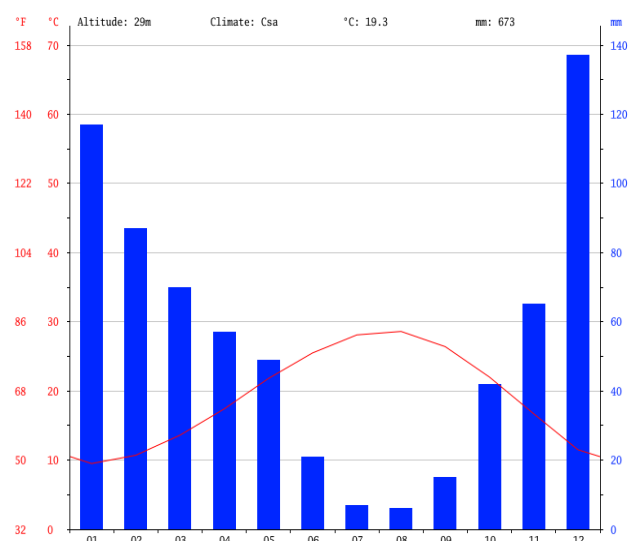


Figure 12. Mediterranean Region's annual precipitation and temperature graphic [35]

Overall, the comparative analysis of object-based and pixel-based classification methods reveals a clear trend favoring object-based approaches, particularly in complex and heterogeneous landscapes such as wetlands [4-8]. The ability of object-based methods to incorporate spatial relationships and contextual information significantly enhances classification accuracy, making them a valuable tool in remote sensing applications.

CART has been recognized for its interpretability and simplicity, making it a valuable tool in specific applications. In some comparative studies for mapping wetlands or land use / land cover areas [36-40], the authors evaluated the performance of CART alongside RF and SVM. The results indicated that while RF achieved the highest accuracy, CART provided competitive results with a lower computational cost, making it suitable for scenarios where interpretability is crucial. These results are especially important for wetland mapping. The choice of algorithm should be guided by the study, including the landscape's complexity, the need for interpretability, and the available computational resources.

4 Conclusion

Coastal change analysis is significant for wetland management and environmental studies. Coastal areas can change because of climatic changes, anthropogenic activities and natural factors. In this study, object-based classification and post-classification comparison analysis were done. After obtaining the objects from the Landsat 8 LDCM satellite images of the seasons of 2016, these objects were classified using CART. CART showed excellent performance in classifying satellite images of different seasons used in the study. Post classification comparison was then used to determine the changes between the classified images.

The change in the lake area from February to May has been caused by the increase in temperature and evaporation and the decrease in precipitation. A decrease in the lake area was expected due to the increase in temperature and decrease in precipitation from May to August, but the opposite situation has occurred. It has been determined that this situation was caused by natural factors such as soil permeability and anthropogenic activities such as irrigation. There was an increase in precipitation and a decrease in temperature and evaporation from August to November. The lake area was increased as a result of this situation. This research highlights the significance of seasonal monitoring in wetlands, provides a framework for predicting and managing coastal changes in similar ecosystems worldwide.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 16 %

References

- [1] A. Delen ve F. Balık Şanlı, Nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi ile tarımsal ürün deseninin belirlenmesi. TUFUAB IX. Teknik Sempozyumu, Afyonkarahisar, 2017.
- [2] M. Gholoobi, A. Tayyebi, M. Taleyi and A. H. Tayyebi, Comparing pixel based and object based approaches in land use classification in mountainous areas. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Volume XXXVIII. Part 8. Kyoto. Japan, 2010.
- [3] K. Kalkan ve D. Maktav, Nesne tabanlı ve piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırılması (IKONOS Örneği). III. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, Gebze, 2010.
- [4] S. Wang, S. He, J. Wang, J. Li, X. Zhong, J. Cole, E. Kurbanov, and J. Sha, Analysis of Land Use/Cover changes and driving forces in a typical subtropical region of South Africa. Remote Sensing, 15(19), 4823, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15194823>.
- [5] M. Aghababaei, A. Ebrahimi, A. A. Naghipour, E. Asadi, and J. Verrelst, Classification of plant ecological units in heterogeneous semi-steppe rangelands: performance assessment of four classification algorithms. Remote Sensing, 13(17), 3433, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13173433>.
- [6] P. Turissa, N. Bisman, S. Vincentius, K. Dony and M. Hawis, Evaluation methods of change detection of seagrass beds in the waters of Pajenekang and Gusung Selayar. Trends in Sciences, 18(23), 677, 2021. <https://doi.org/10.48048/tis.2021.677>.
- [7] E. E. Tonyaloğlu, N. Erdogan, B. Çavdar, K. Kurtşan, and E. Nurlu, Comparison of pixel and object based classification methods on rapideye satellite image. Turkish Journal of Forest Science, 5(1), 1-11, 2021. <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.741030>.
- [8] L. A. Qu, Z. Chen, M. Li, J. Zhi, and H. Wang, Accuracy improvements to pixel-based and object-based lulc classification with auxiliary datasets from Google Earth engine. Remote Sensing, 13(3), 453, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13030453>.
- [9] T. Tochamnanvita and W. Muttitanon, Investigation of coastline changes in three provinces of Thailand using remote sensing. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(8), 1079, 2014. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-8-1079-2014>.
- [10] M. Modi, R. Kumar, G. R. Shankar and T. R. Martha, Land cover change detection using object-based classification technique: a case study along The Kosi River, Bihar. The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-8, ISPRS Technical Commission VIII Symposium, Hyderabad, India, 2014.
- [11] H. M. Badjana, J. Helmschrot, P. Selsam, K. Wala, W. A. Flügel, A. Afouda, and K. Akpagana, Land cover changes assessment using object-based image analysis in the Binah River watershed (Togo and Benin). Earth and Space Science, 2(10), 403-416, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014EA000083>.
- [12] E. Sánchez-García, J. E. Pardo-Pascual, A. Balaguer-Beser, and J. Almonacid-Caballer, Analysis of the shoreline Position Extracted from Landsat TM and ETM+ Imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(7), 991, 2015. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-991-2015>.
- [13] X. Lin, Y. Cheng, G. Chen, W. Chen, R. Chen, D. Gao D, Y. Zhang, and Y. Wu, Semantic segmentation of China's coastal wetlands based on Sentinel-2 and Segformer. Remote Sensing, 15(15), 3714, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15153714>.
- [14] A. Gonzalez-Perez, A. Abd-Elrahman, B. Wilkinson, D. J. Johnson, and R. R. Carthy, Deep and machine learning image classification of coastal wetlands using unpiloted aircraft system multispectral images and lidar datasets. Remote Sensing, 14(16), 3937, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14163937>.
- [15] R. Zhou, C. Yang, E. Li, X. Cai, J. Yang, and Y. Xia, Object-based wetland vegetation classification using multi-feature selection of unoccupied aerial vehicle RGB imagery. Remote Sensing, 13(23), 4910, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13234910>.

- [16] S. Adeli, B. Salehi, M. Mahidanpari, and L. J. Quackenbush, Toward a multi-source remote sensing wetland inventory of the USA: preliminary results on wetland inventory of Minnesota. *ISPRS annals of the photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 3, 97-100, 2021. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2021-97-2021>.
- [17] M. H. Kesikoglu, U. H. Atasever, F. Dadaser-Celik, and C. Ozkan, Performance of ANN, SVM and MLH techniques for land use/cover change detection at Sultan Marshes wetland, Turkey. *Water Science and Technology*, 80(3), 466-77, 2019. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.290>.
- [18] O. O. Festus, W. Ji, and O. A. Zubair, Characterizing the landscape structure of urban wetlands using terrain and landscape indices. *Land*, 9(1), 29, 2020. <https://doi.org/10.3390/land9010029>.
- [19] H. Ç. Çiftçi, K. Gümüş, and M. G. Gümüş, Analyzing land use and climate change impacts of Suğla water storage in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(7), 6797-6814, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05043-0>.
- [20] T. Feng, H. Ma, and X. Cheng, Land-cover classification of high-resolution remote sensing image based on multi-classifier fusion and the improved Dempster-Shafer evidence theory. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(1), 014506-014506, 2021. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.15.014506>.
- [21] J. P. Simioni, L. A. Guasselli, G. G. De Oliveira, L. F. Ruiz, and G. De Oliveira, A comparison of data mining techniques and multi-sensor analysis for inland marshes delineation. *Wetlands Ecology and Management*, 28(4), 577-594, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11273-020-09731-2>.
- [22] M. Mahdianpari, B. Brisco, J. E. Granger, F. Mohammadimanesh, B. Salehi, S. Banks, S. Homayouni, L. Bourgeau-Chavez, and Q. Weng, The second generation Canadian wetland inventory map at 10 meters resolution using Google Earth Engine. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 46(3), 360-375, 2020. <https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1802584>.
- [23] S. Gxokwe, T. Dube, and D. Mazvimavi, Leveraging Google Earth Engine platform to characterize and map small seasonal wetlands in the semi-arid environments of South Africa. *The Science of the Total Environment*, 803, 150139, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150139>.
- [24] F. Büyükdeveci, Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyısında bulunan Ağyatan (Hurma Boğazı) lagününde yakalanan türlerin av kompozisyonu ve av verimi. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 8(3), 559-567, 2023. <https://doi.org/10.35229/jaes.1350126>.
- [25] M. A. Çelik, Y. Kızılelma, A. E. Gülersoy, ve M. Denizdurduran, Farklı uzaktan algılama teknikleri kullanılarak aşağı Seyhan ovası güneyindeki sulak alanlarda meydana gelen değişimin incelenmesi (1990-2010). *Electronic Turkish Studies*, 8(12), 263-284, 2013.
- [26] United States Geological Survey (USGS), EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>, Accessed 13 March 2017.
- [27] United States Geological Survey (USGS), What are the band designations for the Landsat satellites? http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php, Accessed 13 March 2017.
- [28] Ç. Göksel, R. M. David, and A. O. Dogru, Environmental monitoring of spatio-temporal changes in northern Istanbul using remote sensing and GIS. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 5(1), 94-103, 2018. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.410943>.
- [29] C. Witharana, and D. L. Civco, Optimizing multi-resolution segmentation scale using empirical methods: Exploring the sensitivity of the supervised discrepancy measure Euclidean distance 2 (ED2). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 108-121, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.006>.
- [30] M. H. Kesikoglu, U. H. Atasever, C. Ozkan, and E. Besdok, The usage of rusboost boosting method for classification of impervious surfaces. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 981-985, 2016. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B7-981-2016>.
- [31] P. Z. Firouzabadi and E. Ghanavati, Digital approaches for change detection in urban environment, *Geographical Research*, 22(1), 84, 133-146, 2007.
- [32] M. H. Kesikoglu, Ü. H. Atasever, and C. Özkan, Unsupervised change detection in satellite images using fuzzy c-means clustering and principal component analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 129-132, 2013. <https://doi.org/10.5194/isprsrarchives-XL-7-W2-129-2013>.
- [33] L. Bruzzone, and D. Prieto, Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 38(3), 1771-1182, 2000.
- [34] F. Pacifici, F. D. Frate, C. Solimini, and W. Emery, An innovative neural-net method to detect temporal changes in high-resolution optical satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(9), 2940-2952, 2007. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.902824>.
- [35] Climate Data, İklim Karataş (Türkiye). <https://tr.climate-data.org/location/26497/>, Accessed 20 May 2017.
- [36] F. Mohseni, M. Amani, P. Mohammadpour, M. Kakooei, S. Jin, and A. Moghimi, Wetland mapping in great lakes using Sentinel-1/2 time-series imagery and DEM data in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 15(14), 3495, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15143495>.

- [37] X. B. Tran, V. Vambol, and T. D. Luu, Assessing forest cover changes in Dak Lak province (Central Highlands of Vietnam) from multi-temporal Landsat data and machine learning techniques. *Ecological Questions*, 35(3), 1-18. <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.035>.
- [38] T. K. Oo, N. Arunrat, S. Sereenonchai, A. Ussawarujikulchai, U. Chareonwong, and W. Nutmagul, Comparing four machine learning algorithms for land cover classification in gold mining: A case study of Kyaukpahto Gold Mine, Northern Myanmar, *Sustainability*, 14(17), 10754, 2022. <https://doi.org/10.3390/su141710754>.
- [39] S. Aldiansyah, and R. A. Saputra, Comparison of machine learning algorithms for land use and land cover analysis using Google Earth engine (Case study: Wanggu watershed). *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 19(2), 197-210, 2023.
- [40] C. U. Rahayu, I. Indarto, and B. E. Cahyono, Using sentinel and comparing two classification algorithms for land cover mapping in the area dominated by small scale heterogeneous agricultural land. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Bristol, UK, 2022.





Ticari soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının kalite kriterlerinin, oksidatif stabilitelerinin ve yağ asidi kompozisyonlarının belirlenmesi

Determination of the quality criteria, oxidative stability, and fatty acid composition of commercial cold-pressed flaxseed and hempseed oils

Kutlu Çevik^{1,*} , Hamza Alaşalvar² , Hasan Yalçın³ 

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, 70100, Karaman Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri Türkiye

Öz

Bu çalışmada, piyasada ticari olarak satılan 4 farklı markaya ait soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının kalite kriterlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yağ örneklerinin serbest yağ asidi değerlerinin kodeks limit sınırlarında olduğu belirlenirken, aynı markaya ait keten ve kenevir yağı örneklerinin peroksit sayısı değerlerinin kodeks limitlerini aştığı ve uymadığı tespit edilmiştir. Bu yağ örneklerinin diğer oksidasyon değerlerinin de yüksek olduğu belirlenmiştir. Keten ve kenevir tohumu yağlarında baskın olarak linoleik ve α -linolenik (ALA) yağ asitleri tespit edilmiştir. Bir markaya ait keten tohumu yağının ALA içeriğinin literatür verilerine kıyasla düşük olduğu ve içerisinde farklı bir karışım yağ olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, her iki yağ örneğinde de γ -linolenik asit olduğu da tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Keten, Kenevir, Oksidasyon, Yağ asidi kompozisyonu, α -Linolenik asit.

1 Giriş

Soğuk pres tohum yağlarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Keten tohumu, kenevir tohumu, chia tohumu, perilla tohumu, çörek otu tohumu, aspir tohumu ve haşhaş tohumu gibi çeşitli yağlı tohumlardan soğuk pres yağlar elde edilebilmektedir. Bu materyaller arasından keten ve kenevir tohumlarından elde edilen soğuk pres yağlar insan sağlığı üzerine etkileri ile ön plana çıkmaktadır [1, 2]. Keten tohumu yağı yüksek seviyede (%60) α -linolenik asit (ALA) içermektedir. Keten tohumu yağının yapısında önemli seviyede bulunan bu yağ asidi insan vücudunda sentezlenemediği için esansiyel yağ asidi olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, bu yağ asidi omega-3 yağ asidi olarak da adlandırılmaktadır. Keten tohumu yağı başka bir esansiyel yağ asidi olan linoleik asidi de yapısında önemli düzeyde bulundurmaktadır. Bu iki esansiyel yağ asidini yapısında yüksek seviyede bulundurmasından dolayı keten tohumu yağına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [3]. Kenevir tohumu yağı ise yapısında yaklaşık %57 oranında linoleik asit (LA), %12 oranında da ALA bulunmaktadır. Bu yağ asitlerinin birbirine oranı yaklaşık olarak 1:3 olurken, bu oran insan beslenmesinde ideal düzey olarak kabul

Abstract

This study aimed to determine the quality criteria of cold-pressed flaxseed and hempseed oils from four different commercial brands available on the market. While the free fatty acid content of the oil samples was found to be within the codex limit values, the peroxide values of flaxseed and hempseed oil samples from the same brand exceeded and did not comply with the codex limits. The other oxidation values of these oil samples were also found to be high. Linoleic acid and α -linolenic acid (ALA) were identified as the predominant fatty acids in both flaxseed and hempseed oils. One flaxseed oil sample from a specific brand exhibited lower ALA content compared to the literature data, leading to the conclusion that it contained a different oil mixture. Additionally, γ -linolenic acid was detected in both oil samples.

Keywords: Flaxseed, Hempseed, Oxidation, Fatty acid composition, α -Linolenic acid.

görmektedir. Buna ek olarak yaklaşık %4 oranında γ -linolenik asit (GLA) içermekte ve bu yağ asidinin insan sağlığı açısından birçok fonksiyona sahip olduğu ifade edilmektedir [4].

Keten ve kenevir tohumu yağları içerdikleri bu yağ asitleri sebebiyle insan sağlığını korumada önemli bir rol oynamaktadırlar. Ancak, bu yağlar içeriğindeki çoklu doymamış yağ asitlerinden dolayı oksidatif bozulmalara oldukça hassastırlar. Ayrıca, soğuk pres yöntemiyle elde edilen bu tohum yağlarının üretim süresince sürtünmeden dolayı oksidasyon seviyeleri de önemli düzeyde artabilmektedir. Bu durum, yağların kimyasal stabilitesini olumsuz etkileyerek besin değerlerinin azalmasına ve raf ömürlerinin kılınmasına neden olabilmektedir. Son ürünün kalitesinin olumsuz etkilenmemesi için üretim sırasında sıcaklık artışının kontrol edilmesi önem arz etmektedir [5, 6]. Soğuk pres tekniği ile üretilen yağların kalitesi Türk Gıda Kodeksi (TGK), Bitki Adı ile Anılan Yağlar Tebliğinde belirtilen kriterlere uyması gerekmektedir. Soğuk pres yöntemiyle üretilmiş yağların asit sayısı değeri en çok 4,0 mg KOH/g yağ olması gerekirken, peroksit sayısı değerinin ise en çok 15 meq O₂/kg yağ ile sınırlandırılmıştır [7].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kutlucevik@kmu.edu.tr (K. Çevik)

Geliş / Received: 23.10.2024 Kabul / Accepted: 24.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1572578

Teh ve Birch [8], soğuk pres keten, kenevir ve kanola tohum yağlarının serbest yağ asitliği, oksidasyon değerleri ve yağ asidi kompozisyonları gibi yağların karakteristik ve kalite özelliklerini incelemişler ve kodeks uygunluğunu araştırmışlardır. Başka bir çalışmada ise, İstanbul'da satışı olan soğuk pres çörek otu, rüşeym, üzüm çekirdeği ve kayısı çekirdeği yağlarının kimyasal özellikleri incelenmiştir. Yağların TGK'ye uygunluğu incelenmiş ve bazı yağların kalite kriterlerinin tebliğe uygun olmadığını tespit etmişlerdir [9]. Uluata ve Özdemir [10], farklı yağlı tohumlardan elde ettikleri soğuk pres yağlarının oksidasyon stabilitesi gibi kalite parametrelerini incelemişlerdir. Tura vd. [11], ticari satışı bulunan 13 farklı kenevir tohumu yağlarının kalite parametrelerini araştırmışlardır. Bazı yağların tebliğde belirtilen kalite parametreleri üst limit değerlerini aştığını bildirmişlerdir. Symoniuk vd. [12] tarafından yapılan bir çalışmada, ticari satışı yapılan 10 farklı soğuk pres tohum yağlarının kalite parametrelerini araştırmışlardır. Literatürde yer alan bu çalışmalar göstermektedir ki, ticari satışı olan soğuk pres yağların kalitelerinin araştırılması ve tebliğe uygunluğunun belirlenmesi gibi yaklaşımlar hem tüketici sağlığının korunması hem de sektördeki standartların değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, piyasada ticari olarak satılan 4 farklı markaya ait soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının kalitelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Piyasadan satın alınan yağ örneklerinde; serbest yağ asitliği, peroksit, konjuge dien, konjuge trien, *p*-Anisidin, Totoks, klorofil, karotenoid ve yağ asidi kompozisyonu analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ile ticari yağların karakteristik özellikleri, kalite kontrolü ve tüketici sağlığı açısından güvenilirlikleri değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyaller

Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağları İstanbul, Ankara ve Konya gibi büyükşehirlerde bulunan marketlerden satın alınmıştır. Yağ örnekleri 4 °C'de muhafaza edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kimyasallar analitik saflık derecesine sahiptir (Sigma Aldrich, Almanya).

2.2 Analizler

2.2.1 Serbest yağ asitliği analizi

Serbest yağ asitliği (SYA) analizi AOAC [13]'nin prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 2 g yağ örneği erlen içerisine tartılmış ve üzerine nötrlenmiş 50 mL etanol:dietil eter (1:1, v/v) karışımı eklenerek yağ çözündürülmüştür. Bu karışımın üzerine 2-3 damla etanolle hazırlanmış %1'lik (w/v) fenoltalein eklenmiş ve sonrasında 0.01 N'lik sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılarak titrasyon gerçekleştirilerek sarfiyat kaydedilmiştir. Örneklerin SYA içeriği, oleik asit cinsinden yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

2.2.2 Refraktif indeks analizi

Yağ örneklerinde refraktif indeks (kırılma indisi) analizi dijital refraktometre (RA-600, KEM, Japonya) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Öncelikle cihaz saf su ile kalibre

edildikten sonra yağ örneklerinin refraktif indeks değerleri 20°C'de ölçülmüştür.

2.2.3 Peroksit değeri analizi

Yağ örneklerinin peroksit sayısı analizi AOAC [13]'nin metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 2 g yağ örneğinin üzerine 25 mL kloroform:asetik asit (2:3, v/v) karışımı eklenerek yağ çözündürülmüştür. Bu karışıma 1 mL taze aşırı doymuş potasyum iyodür (KI) çözeltisi eklenerek karıştırıldıktan sonra karanlıkta 5 dakika bekletilmiştir. Bekleme sonunda 25 mL saf su ilave edilerek karıştırılmış ve üzerine 0.5 mL %1'lik (w/v) çözünür nişasta çözeltisi ilave edilmiştir. Bu karışım 0.01 N'lik sodyum tiyosülfat kullanılarak koyu mavi renk kayboluncaya kadar titrasyon gerçekleştirilerek sarfiyat kaydedilmiştir. Peroksit değeri meq O₂/kg yağ olarak ifade edilmiştir.

2.2.4 Özgül soğurma analizi

Yağ örneklerinin konjuge dien ve trien analizleri spektrofotometrik (UV-1800, Shimadzu, Japonya) yöntemle belirlenmiştir. Yağ örnekleri izooktan ile çözündürüldükten sonra 232 ve 268 nm'de izooktana karşı absorbans okumaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir [14].

2.2.5 *p*-Anisidin analizi

Yağ örneklerinin *p*-Anisidin analizi AOAC [15]'nin prosedürüne göre tespit edilmiştir. Yaklaşık 2 g yağ örneği 25 mL'lik balon jöjeye tartılıp hacim çizgisine kadar izooktan eklenerek yağ çözündürülmüştür. Yağ çözündürüldükten sonra bu karışımın absorbansı 350 nm'de izooktana karşı spektrofotometre (UV-1800 Shimadzu, Japonya) okunarak kaydedilmiştir (A1). Daha sonra iki farklı deney tüpünün birine 5 mL yağ içeren çözeltiden, diğer tüpe 5 mL izooktan konulmuş ve bu deney tüplerinin üzerine asetik asitle hazırlanmış 1 mL *p*-Anisidin çözeltisi (%0.25, w/v) eklenmiştir. Bu tüpler karanlıkta 10 dakika bekletildikten sonra yağ içeren örneklerinin absorbans değerleri, *p*-Anisidin içeren izooktana karşı spektrofotometre yardımıyla 350 nm'de ölçülmüştür (A2). Ölçümler sonrasında yağ örneklerinin *p*-Anisidin değerleri **Denklem (1)**'e göre hesaplanmıştır.

$$p - \text{Anisidin} = 25 \times \frac{(1.2 A2 - A1)}{\text{Örnek miktarı (g)}} \quad (1)$$

2.2.6 Totoks değeri

Yağ örneklerinin toplam oksidasyon (Totoks) değeri, peroksit sayısı (PD) ve *p*-Anisidin (pAD) değerleri kullanılarak **Denklem (2)**'ye göre hesaplanmıştır [16].

$$\text{Totoks} = 2 (PD) + pAD \quad (2)$$

2.2.7 Klorofil ve karotenoid analizi

Yağ örneklerinin klorofil içeriği AOCS'nin Cc 13i-96 metoduna göre gerçekleştirilmiştir [17].

Yağ örneklerinin karotenoid miktarları Zhang vd. [18] tarafından belirtilen metoda göre belirlenmiştir. Yağlar aseton: heksan (4:6, v/v) karışımında çözündürüldükten sonra spektrofotometre yardımıyla 453, 505, 645 ve 663 nm

dalga boylarında absorban okumaları gerçekleştirilmiştir. Karotenoid seviyesi mg β -karoten/kg yağ olarak ifade edilmiştir.

2.2.8 Yağ asitleri kompozisyonu analizi

Yağ örneklerinin metil esterlerinin hazırlanması IUPAC metoduna göre gerçekleştirilmiştir [19]. Metil esterleri elde edilen örneklerin yağ asitleri kompozisyonu alev iyonizasyon dedektörlü ve DB32 kolunu (60m, 0.25mm) ile donatılmış gaz kromatografisi cihazıyla gerçekleştirilmiştir (GC-2010, Shimadzu, Japonya). Enjeksiyon sıcaklığı 230°C, kolon sıcaklığı 190°C, dedektör sıcaklığı 240°C olacak şekilde cihaz şartları ayarlanmış ve taşıyıcı gaz olarak helyum gazı (1 mL/dk) kullanılmıştır. Alıkonma zamanına göre yağ asidi metil esteri standartları kullanılarak örneklerdeki yağ asitleri tanımlanmıştır. Sonuçlar g yağ asidi/100 g toplam yağ asidi olarak ifade edilmiştir [20].

2.2.9 İstatistiksel analiz

Yapılan analizler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirilmesi SPSS 22.0 (SPSS Chicago, ABD) paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar tek yönlü varyans analizi ve Duncan çoklu karşılaştırma testleri kullanılarak %95 güven aralığında değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Serbest yağ asitliği ve refraktif indeks

Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının SYA değerleri sırasıyla **Tablo 1**'de verilmiştir. Soğuk pres keten tohumu yağlarının SYA değerleri %0.31 ile 2.46 arasında olurken, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının SYA değerleri %0.89 ile 2.59 arasında olduğu tespit edilmiştir ($p < 0.05$). Kenevir tohumu yağı örneklerinin SYA değerlerinin keten tohumu yağı örneklerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Gecgel vd. [5], Türkiye'de satışı olan soğuk pres keten tohumu yağının SYA değerinin %0.53 olduğunu belirlemişlerdir. Çelebi [21] tarafından yapılan çalışmada ise, soğuk pres metoduyla elde edilen keten tohumu yağının SYA değerinin %1.17 olduğunu tespit etmiştir. Latif ve Anwar [22], soğuk pres kenevir tohumu yağlarının SYA değerlerinin %1.73 ile 1.87 arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Soğuk pres tohum yağlarının SYA değeri, kullanılan tohumun kalitesi ve soğuk pres işlemi sırasındaki sıcaklığın değişiminden doğrudan etkilenebilmektedir. Ayrıca, üretildikten sonra depolama koşulları da SYA değerinin artmasına neden olmaktadır. Türk Gıda Kodeksi Bitki Adı ile Anılan Yemeklik Yağlar Tebliğinde, soğuk pres yağların serbest yağ asitliği değerinin en çok 4.0 mg KOH/g yağ olduğu bildirilmiştir [7]. Çalışma kapsamında piyasadaki satın alınan soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının kodeks üst limitinin altında olduğu ve tebliğe uygunluk gösterdiği anlaşılmaktadır.

Soğuk pres keten tohumu yağlarının refraktif indeks değerleri 1.4781 ile 1.4811 arasında olduğu belirlenirken, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının refraktif indeks değerleri 1.4770 ile 1.4776 olduğu bulunmuştur. Örnekler arasındaki oluşan farklılıkların istatistiksel olarak önemli düzeyde ($p < 0.05$) olduğu anlaşılmaktadır. Chen vd. [23]

tarafından yapılan çalışmada, kenevir tohumu yağlarının refraktif indeks değerlerinin 1.4773 ile 1.4791 değiştiği raporlanmıştır. Başka bir çalışmada ise, soğuk pres yöntemiyle üretilen kenevir tohumu yağının refraktif indeks değerinin 1.4699 olduğu belirlenmiştir [22]. Zhang vd. [24], iki farklı keten tohumu yağının refraktif indeks değerlerinin 1.4791 ve 1.4805 olduğunu tespit etmişlerdir. Refraktif indeks değerlerinin arasında oluşan farkın yağın doymuşluk derecesinden, çoklu doymamış yağ asitlerinin tekli doymamış yağ asitlerine olan oranından ve oksidasyon ürünleriyle ilişkili olabileceği ifade edilmektedir [5].

3.2 Oksidasyon değerleri

Soğuk pres keten tohumu yağlarının peroksit sayısı değerlerinin 0.78-15.87 meq O₂/kg, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının peroksit sayısı değerlerinin ise 6.51-19.70 meq O₂/kg olduğu belirlenmiştir (**Tablo 1**). Farklı markalara ait olan yağların peroksit sayısı değerleri arasında oluşan farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Ayrıca, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının peroksit sayısı değerlerinin, soğuk pres keten tohumu yağlarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu farklılık tohumların kalitesi, soğuk pres üretimi esnasında işlem şartlarından etkilenebilmektedir. Ayrıca, kenevir tohumu yağının klorofil içeriğinin yüksek olması, yağdaki oksidasyonu artırması şeklinde de yorumlanabilir [25]. Aşağıda verilecek olan klorofil değerlerine bakıldığında kenevir tohumu yağı örneklerinin toplam klorofil içeriğinin, keten tohumu yağı örneklerine kıyasla çok daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır (**Tablo 2**). Türk Gıda Kodeksi Bitki Adı ile Anılan Yemeklik Yağlar Tebliğinde soğuk preslenmiş yağlarda, peroksit sayısının en çok 15 meq O₂/kg yağ olması gerektiği belirtilmiştir [7]. Soğuk pres keten tohumu yağları arasında Ket2, soğuk pres kenevir tohumu yağları arasında da Kenevir2 örneklerinin kodeks tarafından belirtilen üst limiti aştığı belirlenmiştir. Bu örnekler aynı markalara aittir ve bu markanın piyasada sattığı soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının peroksit sayısı değerlerinin tebliğe uymadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum üreticinin kullandığı hammadde, presleme işlemi parametreleri ve depolama koşullarından kaynaklı olarak her iki yağ örneğinin de peroksit sayısı değerinin yüksek olmasına neden olduğu şeklinde yorumlanabilir. Literatürde bulunan çalışmalarda, soğuk pres keten tohumu yağlarının peroksit sayısı değerlerinin 0.25-2.04 meq O₂/kg arasında olduğu bildirilmiştir [1, 5, 8]. Soğuk pres kenevir tohumu yağlarının ise peroksit sayısı değerlerinin 1.54-1.94 meq O₂/kg arasında değiştiği ifade edilmiştir [8, 22]. Tura vd. [11], ticari satışı olan 13 farklı keten tohumu yağının peroksit sayısı değerlerinin 3.97 ile 23.89 meq O₂/kg arasında olduğunu belirlemişlerdir.

Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının konjuge dien (K₂₃₂) ve trien (K₂₆₈) analiz sonuçları **Tablo 1**'de verilmiştir. Peroksit sayısı değerlerinde olduğu gibi konjuge dien ve trien analizleri sonuçları incelendiğinde soğuk pres kenevir tohumu yağlarının özgül soğurma değerlerinin (K₂₃₂: 0.46-0.93, K₂₆₈: 0.24-1.05), soğuk pres keten tohumu yağlarına (K₂₃₂: 1.83-3.76, K₂₆₈: 0.52-0.62) kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1. Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının serbest yağ asitliği, oksidasyon ve refraktif indeks değerleri

Analizler	Keten1	Keten2	Keten3	Keten4	Kenevir1	Kenevir2	Kenevir3	Kenevir4
SYA	0.58±0.02 ^b	0.58±0.01 ^b	0.31±0.01 ^a	2.46±0.07 ^c	1.30±0.04 ^b	2.59±0.04 ^d	0.89±0.01 ^a	2.14±0.04 ^c
Peroksit	2.64±0.38 ^b	15.87±0.15 ^c	0.78±0.11 ^a	3.13±0.71 ^b	12.74±0.70 ^c	19.70±0.57 ^d	6.51±0.42 ^a	9.18±1.15 ^b
K ₂₃₂	0.50±0.01 ^b	0.59±0.01 ^c	0.46±0.01 ^a	0.93±0.01 ^d	1.90±0.00 ^b	3.76±0.02 ^d	1.83±0.01 ^a	2.42±0.02 ^c
K ₂₆₈	0.33±0.00 ^c	1.05±0.00 ^b	0.24±0.02 ^a	0.31±0.01 ^b	0.52±0.00 ^b	0.54±0.00 ^c	0.47±0.01 ^a	0.62±0.00 ^d
<i>p</i> -Anisidin	0.51±0.06 ^b	3.08±0.22 ^c	0.22±0.14 ^a	0.13±0.07 ^a	2.19±0.03 ^c	1.05±0.24 ^a	1.72±0.27 ^b	1.90±0.09 ^b
Totoks	5.79±0.71 ^b	34.76±0.28 ^c	1.71±0.26 ^a	6.39±1.37 ^b	27.67±1.38 ^c	40.42±1.04 ^d	14.64±0.68 ^a	20.21±2.27 ^b
Refraktif indeks	1.4798 ^b	1.4811 ^d	1.4808 ^c	1.4781 ^a	1.4774 ^b	1.4770 ^a	1.4776 ^c	1.4774 ^b

*Aynı satırda bulunan farklı harfler aynı yağ örnekleri arasındaki farkın anlamlı olduğunu ifade etmektedir (p<0.05).

**Keten: soğuk pres keten tohumu yağı örnekleri, Kenevir: soğuk pres kenevir tohumu yağı örnekleri, K₂₃₂: konjuge dien, K₂₆₈: konjuge trien.

Bu durum yine kenevir tohumu yağının yüksek oranda prooksidan madde olan klorofili içermesinden kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanabilir. Turco vd. [25]'nin yaptıkları çalışmada, kenevir tohumu yağının filtrelenmesi sonucunda klorofilin uzaklaştırıldığı ve yağın oksidasyon değerlerinin olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir. Bu bulgular ışığında, kenevir tohumu yağlarının keten tohumu yağlarına kıyasla daha yüksek oksidasyon değerlerine sahip olmasının sebeplerinin başında, kenevir tohumu yağının daha yüksek seviyede klorofil içermesi ile açıklanabilmektedir.

Türk Gıda Kodeksinde konjuge dien ve trien seviyeleri için herhangi bir limit bulunmamaktadır. Teh ve Birch [8], soğuk pres keten tohumu yağının konjuge dien (K₂₃₂) ve trien (K₂₇₀) değerlerinin sırasıyla 2.08 ve 0.02 olurken, soğuk pres kenevir tohumu yağının konjuge dien (K₂₃₂) ve trien (K₂₇₀) değerlerinin de sırasıyla 1.53 ve 0.02 olduğunu raporlamışlardır. Başka bir çalışmada ise, soğuk pres kenevir tohumu yağının konjuge dien ve trien değerlerinin sırasıyla 2.58 ve 0.45 olduğu bulunmuştur [26]. Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar ile literatür verileri benzerlik göstermektedir.

Soğuk pres keten tohumu yağlarının *p*-Anisidin değerlerinin 0.13 ile 3.08 arasında olduğu belirlenirken, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının *p*-Anisidin değerlerinin 1.05 ile 2.19 arasında olduğu tespit edilmiştir (Tablo 1). En yüksek *p*-Anisidin değerleri, keten tohumu yağları arasından Keten2 (3.08) örneğinde, kenevir tohumu yağları arasından ise Kenevir1 (2.19) örneğinde olduğu belirlenmiştir. Yağ örnekleri arasındaki farklılıkların da istatistiksel açıdan anlamlı olduğu tespit edilmiştir (p<0.05). Dedebaş vd. [1], soğuk pres keten tohumu yağının *p*-Anisidin değerinin 0.25 olduğunu belirlemişlerdir. Latif ve Anwar [22], soğuk pres kenevir tohumu yağlarının *p*-Anisidin değerlerinin 1.83 ile 2.11 olduğunu bildirmişlerdir. Bir başka çalışmada ise, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının *p*-Anisidin değerlerinin 0.97 ile 1.34 olduğunu raporlanmıştır [27]. Çalışmamızdaki *p*-Anisidin değerleri ile literatür verileri benzerlik göstermektedir.

Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının Totoks değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Keten tohumu yağları arasından en yüksek Totoks değeri Keten2 (34.76) örneğinde, kenevir tohumu yağları arasından en yüksek Totoks değeri Kenevir2 (40.42) örneğinde olduğu tespit

edilmiştir. Bu aynı markaya ait olan soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının oksidasyon değerlerinin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumun muhtemel sebeplerinden biri soğuk pres yöntemiyle yağ üretimi sırasında sürtünmeye bağlı olarak ortaya çıkan ısının, elde edilen yağdaki oksidasyonu hızlandırması olarak düşünülmektedir. Ayrıca, üretildikten sonra yağın muhafaza şartlarına bağlı olarak da oksidasyon değerlerinde artışın meydana gelmesi diğer bir önemli sebeptir. Dahası, yağın içerisinde bulunan prooksidan bileşikler (klorofiller, metaller, lipit peroksitler) oksidasyon değerlerini etkileyebilmektedir [25]. Bu değişkenlerden dolayı da yağların oksidasyon analizleri arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Symoniuk vd. [28], soğuk pres keten tohumu yağlarının Totoks değerlerinin 3.12 ile 9.07 arasında olduğunu ifade etmişlerdir. Islam vd. [27] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının Totoks değerlerinin 23.36 ile 38.70 arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında elde ettiğimiz Totoks verileriyle, literatür değerleri uyumluluk göstermektedir.

3.3 Klorofil ve karotenoid

Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının klorofil-A, klorofil-B, toplam klorofil ve karotenoid değerlerine ait veriler Tablo 2'de yer almaktadır. Keten tohumu yağlarının toplam klorofil değerleri 10.4 ile 31.49 mg/kg, karotenoid seviyeleri ise 29.70 ile 62.59 mg/kg arasında olduğu ve bu değerlerin istatistiksel düzeyde farklılık oluşturduğu belirlenmiştir (p<0.05). Keten1 örneği en düşük toplam klorofil değerine sahipken, bu örnek aynı zamanda en yüksek karotenoid değerine de sahiptir. Bu örnek aynı zamanda oksidasyon değerleri de düşüktür (Tablo 1). Prooksidan madde olan klorofili düşük seviyede içermesi aynı zamanda antioksidan özellik gösteren karotenoidleri de yapısında yüksek miktarda bulundurması sebebiyle bu yağda (Keten1) oksidasyon reaksiyonlarının diğer yağlara kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleşmesine neden olduğu şeklinde açıklanabilir.

Kenevir tohumu yağlarının toplam klorofil içeriği 75.87 ile 141.62 mg/kg, karotenoid içeriği de 20.83 ile 50.94 mg/kg arasında olduğu belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının klorofil ve β -karoten değerleri

Analizler	Keten1	Keten2	Keten3	Keten4	Kenevir1	Kenevir2	Kenevir3	Kenevir4
Klorofil-A (mg/kg)	6.98±1.80 ^a	19.29±1.15 ^c	6.98±1.48 ^a	14.91±2.19 ^b	65.14±0.33 ^a	61.44±2.59 ^a	109.88±4.29 ^b	105.65±1.94 ^b
Klorofil-B (mg/kg)	3.50±0.88 ^a	12.20±1.52 ^b	10.76±0.99 ^b	14.87±2.51 ^c	12.62±1.64 ^a	14.43±2.72 ^{ab}	31.74±2.87 ^c	18.26±2.28 ^b
Toplam klorofil (mg/kg)	10.48±1.99 ^a	31.49±1.51 ^b	17.74±0.83 ^a	29.78±0.69 ^b	77.76±1.36 ^a	75.87±1.26 ^a	141.62±1.90 ^c	123.90±2.51 ^b
β -karoten (mg/kg)	62.59±1.31 ^c	30.42±1.13 ^a	35.29±2.21 ^b	29.70±1.94 ^a	24.75±1.79 ^a	20.83±1.53 ^a	50.94±2.20 ^c	39.09±3.32 ^b

*Aynı satırda bulunan farklı harfler aynı yağ örnekleri arasındaki farkın anlamlı olduğunu ifade etmektedir (p<0.05).

**Keten: soğuk pres keten tohumu yağı örnekleri, Kenevir: soğuk pres kenevir tohumu yağı örnekleri

Kenevir tohumu yağları arasında en yüksek toplam klorofil değerine sahip örnek Kenevir3 olurken, bu örnek aynı zamanda en yüksek karotenoid içeriğine de sahip olduğu görülmektedir. Klorofil içeriği yüksek olmasına rağmen, diğer örneklerle kıyasla daha yüksek seviyede karotenoid içermesi, yağın oksidasyona karşı stabilitesini arttırabileceği yorumu yapılabilir. Bu örneğin (Kenevir3) oksidasyon analiz değerleri incelendiğinde, kenevir tohumu yağı örnekleri arasında en düşük Totoks değerine sahip olduğu görülmektedir (Tablo 2). Antioksidan etki gösteren karotenoidleri yüksek seviyede içermesinden dolayı Kenevir3 örneğinde meydana gelebilecek oksidasyon reaksiyonlarının sınırlandırıldığı düşünülmektedir. Genel olarak bakıldığında keten tohumu yağlarının kenevir tohumu yağlarına kıyasla daha düşük seviyede klorofil içerdiği sonucuna ulaşılmıştır. Benzer bulgular Teh ve Brich [8] tarafından da tespit edilmiştir. Çalışmada, keten tohumu yağının kenevir tohumu yağına kıyasla daha düşük seviyede klorofil içerdiği ifade edilmiştir. Turco vd. [25], soğuk pres kenevir tohumu yağının toplam klorofil içeriğinin 65.44 mg/kg, karotenoid seviyesinin ise 52.70 mg/kg olduğunu belirlemişlerdir. Yapılan farklı bir çalışmada ise, soğuk pres keten tohumu yağlarının karotenoid seviyelerinin 18.43-38.75 mg/kg, klorofil içeriğinin ise 0.06-0.79 mg/kg olduğu tespit edilmiştir. Yine aynı çalışmada araştırmacılar, kenevir tohumu yağlarının klorofil içeriğinin 3.30-4.02 mg/kg, karotenoid içeriğinin de 12.89-18.26 mg/kg olduğunu belirlemişlerdir [12]. Symoniuk vd. [28], 15 farklı keten tohumu yağının klorofil ve karotenoid seviyelerinin sırasıyla 0.06-3.93 mg/kg, 19.23-67.97 mg/kg arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Yağların klorofil ve karotenoid seviyeleri, tohumun kalitesi, elde edilme yöntemi ve şartları gibi birçok faktörden etkilenebilmektedir.

3.4 Yağ asidi kompozisyonu

Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının yağ asidi kompozisyonuna ait veriler Tablo 3'te sunulmuştur. Her iki yağ örneğinde; miristik, palmitik, stearik, oleik, linoleik, γ -linolenik, α -linolenik ve araşidik yağ asitleri tespit edilmiştir. Soğuk pres keten tohumu yağlarında baskın yağ asidi olarak ALA tespit edilirken, soğuk pres kenevir tohumu yağlarının baskın yağ asidinin LA olduğu belirlenmiştir. Soğuk pres keten tohumu yağında tespit edilen yağ asitlerinin seviyelerindeki farkın gruplar arasında istatistiksel düzeyde önemli olduğu bulunmuştur (p<0.05). Özellikle de Keten2 örneğinin diğer soğuk pres keten tohumu yağlarına kıyasla ALA seviyesinin düşük, LA seviyesinin de yüksek olduğu

tespit edilmiştir (Tablo 3). Bu durum, bu yağ (Keten2) örneğine, LA içeriği yüksek olan bir yağın eklendiği şeklinde yorumlanabilir. Ayçiçek yağı gibi bir yağ, soğuk pres keten tohumu yağına eklenmesiyle bu yağ asidi kompozisyonunun oluşabileceği düşünülmektedir. Keten tohumu yağının baskın yağ asidi ALA olduğu bilinmektedir. Literatür verileri incelendiğinde keten tohumu yağının ALA içeriği %45-60 arasında değişti belirlenmiştir [5, 24, 29]. Keten tohumu yağları, ALA haricinde diğer önemli yağ asitleri olan oleik asit ve LA seviyelerinin de %15'ten yüksek olduğu belirlenmiştir. Gecgel vd. [5] tarafından yapılan çalışmada, soğuk pres keten tohumu yağının ALA, LA ve oleik asit seviyelerinin sırasıyla %22.79, %13.51 ve %56.25 olduğunu belirlemişlerdir.

Soğuk pres kenevir tohumu yağlarında baskın yağ asidi olarak LA tespit edilmiştir (Tablo 3). Soğuk pres kenevir tohumu yağları arasında LA seviyesinde oluşan farkın istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı bulunmuştur (p>0.05). Kenevir tohumu yağlarının LA'dan sonra içerdiği diğer baskın yağ asitleri ise ALA ve oleik asit olduğu belirlenmiştir. Bu yağ asitleri bakımından örnekler arasında istatistiksel düzeyde önemli farklar oluşmuştur (p<0.05). Kenevir tohumu yağları arasında en düşük ALA seviyesi Kenevir4 (%16.81) örneğin olurken, en yüksek oleik asit (%16.38) seviyesi yine aynı örnek (Kenevir4) olduğu belirlenmiştir. Soğuk pres kenevir yağı örneklerinin %0.54-1.28 seviyelerinde GLA içerdiği belirlenmiştir. Tura vd. [11] tarafından yürütülen bir çalışmada, ticari satışı olan kenevir tohumu yağlarının yağ asidi kompozisyonunda baskın yağ asidinin LA olduğunu tespit etmişlerdir. Belirlenen yağ asidinin seviyelerinin %38.48-52.16 arasında değiştiği rapor edilmiştir. Bu yağ asidi haricinde diğer baskın yağ asitlerinin ALA ve oleik asit olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, %1.09-4.43 arasında GLA olduğunu da tespit etmişlerdir. Teh ve Birch [8], soğuk pres keten tohumu yağının %59.24 ALA, %16.66 LA, %15.20 oleik asit içerdiğini, GLA ise içermediğini belirlemişlerdir. Aynı çalışmada, soğuk pres kenevir tohumu yağının ise %56.85 LA, %18.76 ALA, %9.56 oleik asit ve %4.76 GLA içerdiğini tespit etmişlerdir. Özdemir vd. [30] yaptıkları çalışmada, %54.85 LA, %18.13 ALA, %15.12 oleik asit ve %0.52 GLA olduğunu tespit etmişlerdir.

Çalışmamızdaki ve literatürdeki keten ve kenevir tohumu yağlarının yağ asitlerinde oluşan farklılığın yağlı tohumun cinsine, hasat edilme dönemine ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişebileceği ifade edilmektedir.

Tablo 3. Soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının yağ asidi kompozisyonları

Yağ asitleri	Keten1	Keten2	Keten3	Keten4	Kenevir1	Kenevir2	Kenevir3	Kenevir4
Miristik asit (14:0)	0.04±0.00 ^b	0.07±0.00 ^c	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.04±0.00	T.E.	0.03±0.00	0.04±0.00
Palmitik asit (16:0)	5.94±0.11 ^b	6.22±0.21 ^b	5.35±0.12 ^a	5.32±0.11 ^a	6.39±0.12	6.49±0.11	6.34±0.08	6.38±0.13
Stearik asit (18:0)	4.83±0.05 ^c	3.36±0.05 ^a	3.88±0.08 ^b	3.90±0.01 ^b	2.76±0.04	2.69±0.16	2.59±0.15	2.73±0.07
Oleik asit (18:1)	22.22±0.06 ^d	19.54±0.19 ^b	20.63±0.14 ^c	18.22±0.14 ^a	15.35±0.11 ^a	15.13±0.08 ^a	15.15±0.13 ^a	16.38±0.10 ^b
Linoleik asit (18:2, n-6)	17.13±0.05 ^c	42.32±0.07 ^d	15.41±0.00 ^a	16.08±0.07 ^b	56.43±0.38	56.31±0.69	56.40±0.61	56.61±0.62
γ-linolenik asit (18:3, n-6)	0.27±0.05 ^a	0.31±0.04 ^a	0.67±0.07 ^b	0.32±0.03 ^a	0.92±0.19	1.28±0.22	1.14±0.18	0.54±0.09
α-linolenik asit (18:3, n-3)	49.46±0.23 ^b	28.01±0.09 ^a	53.98±0.13 ^c	56.05±0.09 ^d	17.51±0.02 ^b	17.55±0.03 ^b	17.90±0.05 ^c	16.81±0.19 ^a
Araşidik asit (C20:0)	0.10±0.03 ^{ab}	0.17±0.04 ^b	0.06±0.00 ^a	0.06±0.01 ^a	0.60±0.11	0.55±0.09	0.44±0.12	0.51±0.04

*Aynı satırda bulunan farklı harfler aynı yağ örnekleri arasındaki farkın anlamlı olduğunu ifade etmektedir (p<0.05).

**Keten: soğuk pres keten tohumu yağı örnekleri, Kenevir: soğuk pres kenevir tohumu yağı örnekleri, TE: tespit edilemedi.

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında piyasadan satın alınan farklı markalara ait soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının kalite kriterleri değerlendirilmiştir. Yağlar; serbest yağ asitliği, oksidasyon ve yağ asitleri kompozisyonları açısından birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu parametrelerin hem soğuk pres keten tohumu yağı hem de soğuk pres kenevir tohumu yağlarında örnekler arasında farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Yağların serbest yağ asitliği değeri TGK standartlarına uyumluluk gösterirken, bazı markalara ait soğuk pres keten ve kenevir tohumu yağlarının peroksit sayısı üst limitinden daha yüksek olduğu ve TGK'ye uyumluluk göstermediği sonucuna ulaşılmıştır. Yağların oksidasyon değerlerinin klorofil gibi prooksidan maddelerden dolayı değişkenlik gösterebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bir markaya ait soğuk pres keten tohumu yağının yağ asidi kompozisyonu incelendiğinde, literatürden daha düşük ALA, daha yüksek seviyede LA içerdiği tespit edilmiştir. Bu keten tohumu yağının içerisinde LA açısından zengin farklı bir yağ karışımı olduğunu işaret etmektedir. Piyasada farklı birçok markaya ait soğuk pres tohum yağları satışı bulunmaktadır. Ancak, bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, TGK'nin belirlediği olduğu kalite kriterlerine uymayan ve yağın bileşimine farklı yağların eklenmesiyle elde edilen yağların piyasada satıldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] T. Dedeabas, L. Ekici, and O. Sagdic, Chemical characteristics and storage stabilities of different cold-pressed seed oils. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, e15107, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15107>
- [2] N. Mikołajczak, D. A. Sobiechowska, M. Tańska, Edible flowers as a new source of natural antioxidant for oxidative protection of cold-pressed oils rich in omega-3 fatty acids. *Food Research International*, 134, 109216, 2020.

- [3] P. S. Figueiredo, A. Carla Inada, G. Marcelino, C. Maiara Lopes Cardozo, K. de Cássia Freitas, R. de Cássia Avellaneda Guimarães, A. P. de Castro, V. A. do Nascimento, P. Aiko Hiane, Fatty acids consumption: The role metabolic aspects involved in obesity and its associated disorders. *Nutrients*, 9, 1-32, 2017. <https://doi.org/10.3390/nu9101158>
- [4] C. Da Porto, D. Voinovich, D. Decorti, A. Natolino, Response surface optimization of hemp seed (*Cannabis sativa* L.) oil yield and oxidation stability by supercritical carbon dioxide extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*, 68, 45-51, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109216>
- [5] U. Gecgel, A. S. Demirci, G. C. Dulger, U. Gecgel, M. Tasan, M. Arici, O. Ay, Some physicochemical properties, fatty acid composition and antimicrobial characteristics of different cold-pressed oils. *La Rivista italiana delle sostanze grasse*, 93, 187-200, 2015.
- [6] K. K. Singh, D. Mridula, J. Rehal, P. Barnwal, Flaxseed: a potential source of food, feed and fiber. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51, 210-222, 2011. <https://doi.org/10.1080/10408390903537241>
- [7] TGK, Türk Gıda Kodeksi-Bitki Adı ile Anılan Yağlar Tebliği (Tebliğ No: 2012/29), 2012.
- [8] S. S. Teh and J. Birch, Physicochemical and quality characteristics of cold-pressed hemp, flax and canola seed oils. *Journal of Food Composition and Analysis*, 30, 26-31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.01.004>
- [9] H. Pehlivanoglu, E. Önder, and H. E. Kırtıl, İstanbul Piyasasında Satılan Soğuk Pres Yağların Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Tarım Bilimleri Dergisi*, 31, 644-654, 2021. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.780205>
- [10] S. Uluata and N. Özdemir, Antioxidant activities and oxidative stabilities of some unconventional oilseeds. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89, 551-559, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1955-0>
- [11] M. Tura, M. Mandrioli, E. Valli, T. Gallina Toschi, Quality indexes and composition of 13 commercial

- hemp seed oils. *Journal of Food Composition and Analysis*, 117, 105112, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105112>
- [12] E. Symoniuk, K. Ratusz, K. Krygier, Impact of selected chemical characteristics of cold-pressed oils on their oxidative stability determined using the rancimat and pressure differential scanning calorimetry method. *Food Analytical Methods*, 11, 1095-1104, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-1081-1>
- [13] AOAC, Official Methods of Analysis, in Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, 17th edn, vol 2, issue no. 41, 2000.
- [14] C. Da Porto, E. Porretto, D. Decorti, Comparison of ultrasound-assisted extraction with conventional extraction methods of oil and polyphenols from grape (*Vitis vinifera* L.) seeds. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20, 1076-1080, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.12.002>
- [15] AOAC, Official method of analysis (15th ed.). Washington: Association of Official Analytical Chemists, 1998.
- [16] T. Dursun Capar, T. Dedebas, H. Yalcin, L. Ekici, Extraction method affects seed oil yield, composition, and antioxidant properties of European cranberrybush (*Viburnum opulus*). *Industrial Crops and Products*, 168, 113632, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113632>
- [17] AOCS, Official Methods and Recommended Practices of the AOCS, 5th ed.; AOCS Press: Champaign, IL, 1998.
- [18] Z. Zhang, Y. Liu, L. Che, Effects of different drying methods on the extraction rate and qualities of oils from demucilaged flaxseed. *Drying Technology*, 36, 1642-1652, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1421220>
- [19] IUPAC, Standard methods for the analysis of oils, fats, and derivatives. Blackwell Scientific Publications International Union of Pure Applied Chemistry (7th ed), Blackwell Scientific Publications, IUPAC Method 2301, 1987.
- [20] H. Alasalvar, G. Kocer Alasalvar, Z. Yıldırım, Effect of partial fat replacement by hazelnut oil microcapsules in beef burger formulations on physicochemical properties, fatty acid composition, and sensory attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, 1-9, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16644>
- [21] H. M. Çelebi, Soğuk Pres Yöntemi ile Elde Edilen Çeşitli Bitkisel Yağların Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2023.
- [22] S. Latif and F. Anwar, Physicochemical studies of hemp (*Cannabis sativa*) seed oil using enzyme-assisted cold-pressing. *European Journal Lipid Science and Technology*, 111, 1042-1048, 2009. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900008>
- [23] T. Chen, J. He, J. Zhang, H. Zhang, P. Qian, J. Hao, L. Li, Analytical characterization of hempseed (Seed of *Cannabis sativa* L.) oil from eight regions in China. *Journal of Dietary Supplements*, 7, 117-129, 2010. <https://doi.org/10.3109/19390211003781669>
- [24] Z. S. Zhang, L. J. Wang, D. Li, S. J. Li, N. Ozkan, Characteristics of flaxseed oil from two different flax plants. *International Journal of Food Properties*, 14, 1286-1296, 2011. <https://doi.org/10.1080/10942911003650296>
- [25] V. Lo Turco, F. Litrenta, V. Nava, A. Albergamo, R. Rando, G. Bartolomeo, A. G. Potorti, G. Di Bella, Effect of Filtration Process on Oxidative Stability and Minor Compounds of the Cold-Pressed Hempseed Oil during Storage. *Antioxidants*, 12, 1231, 2023. <https://doi.org/10.3390/antiox12061231>
- [26] M. Tura, M. Mandrioli, E. Valli, R. C. Rubino, D. Parentela, T. Gallina Toschi, Changes in the composition of a cold-pressed hemp seed oil during three months of storage. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104270, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104270>
- [27] M. Islam, Y. V. Rajagukguk, A. Siger, J. Tomaszewska-Gras, Assessment of Hemp Seed Oil Quality Pressed from Fresh and Stored Seeds of Henola Cultivar Using Differential Scanning Calorimetry. *Foods*, 12, 135, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12010135>
- [28] E. Symoniuk, K. Ratusz, K. Krygier, Oxidative stability and the chemical composition of market cold-pressed linseed oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119, 1700055, 2017. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700055>
- [29] O. N. Ciftçi, R. Przybylski, M. Rudzin, Lipid components of flax , perilla , and chia seeds. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114, 794–800, 2012. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100207>
- [30] H. Özdemir, E. Bakkalbaşı, I. Javidipour, Effect of seed roasting on oxidative stability and antioxidant content of hemp seed oil. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 2606-2616, 2021. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1188308>





Türkiye'de 6 Şubat 2023'te meydana gelen depremlerin farklı gün ve saatlerdeki konumsal etkilerinin internet tabanlı GNSS değerlendirme servisleri ile istatistiksel analizi

Statistical analysis of the positional effects of earthquakes in Türkiye on February 6, 2023 on different days and times with web-based GNSS evaluation services

Selim Şaşa¹ , Kutalmış Gümüş² , Münevver Gizem Gümüş^{3,*} 

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, 44280, Malatya, Türkiye

^{2,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

Öz

Bu çalışma, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremlerin konumsal etkilerini, internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleriyle istatistiksel olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. TUSAGA-Aktif ağına ait 14 sabit istasyonun gözlemleri, CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX yazılımlarıyla incelenmiştir. Ayrıca, depremden en çok etkilenen EKZ1 istasyonunun 06/02/2023 tarihli farklı saat aralıklarındaki verileri de bu yazılımlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Deprem istasyonların X, Y ve Z koordinat eksenleri üzerindeki etkisi, hem ANOVA hem de Kruskal-Wallis testleri ile istatistiksel olarak incelenmiştir. Analizler, deprem öncesi, deprem günü ve sonrası farklı günler ile deprem gününe ait farklı saat aralıklarına göre GNSS servislerinden elde edilen koordinat değerlerinin istatistiksel farklılıklarını incelemeyi kapsamaktadır. Deprem öncesi ve sonrası koordinat farklılıklarının istatistiksel olarak anlamlı olduğu özellikle Y koordinat ekseninde büyük yer değişimlerinin yaşandığı, Z koordinat eksenindeki değişimlerin ise diğer eksenlere göre daha az olduğu belirlenmiştir. EKZ1 istasyonu için yapılan saatlik analizler, konumsal değişikliklerin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde farklılaştığını ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: ANOVA, Deprem, Doğruluk, GNSS, Kruskal-Wallis, İnternet tabanlı GNSS yazılımları.

1 Giriş

İnternet tabanlı GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) yazılımları, kullanıcıların yüksek doğrulukta koordinat değerlerini kolaylıkla elde etmesini sağlayarak, geçmişten bugüne hızla gelişim göstermiştir. Başlangıçta GNSS verilerinin işlenmesi, yalnızca uzmanlık gerektiren ve ileri düzey cihazlarla erişilebilen bir süreçken, günümüzde internet tabanlı çözümlerle her düzeyde kullanıcı tarafından kullanılabilir hale gelmiştir. Bu yazılımlar, internet üzerinden erişim sağladıkları için, hem saha hem de ofis ortamında hızlı ve verimli sonuç elde etme imkânı sunar [1]. Geçmişte, GNSS verilerinin değerlendirilmesi zorlu ve

Abstract

This study aims to statistically analyze the spatial effects of the Kahramanmaraş-centered earthquakes that occurred on February 6, 2023, using internet-based GNSS data evaluation services. The observations of 14 fixed stations of the TUSAGA-Active network were analyzed with CSRS-PPP, MagicGNSS, and Trimble RTX software. In addition, the data of the EKZ1 station, which was most affected by the earthquake, dated 06/02/2023 at different time intervals, were also evaluated using these software. The effects of the earthquake on the stations' X, Y, and Z coordinate axes were statistically analyzed with both ANOVA and Kruskal-Wallis tests. The analyses include statistical analysis of the statistical differences of coordinate values obtained from GNSS services according to different days before, during, and after the earthquake and other time intervals of the earthquake day. It was determined that the coordinate differences before and after the earthquake were statistically significant, especially in the Y coordinate axis. In contrast, the changes in the Z coordinate axis were less than in the other axes. Hourly analyses for the EKZ1 station revealed that the spatial changes were statistically significant.

Keywords: ANOVA, Earthquake, Accuracy, GNSS, Kruskal-Wallis, Web-based GNSS software.

zaman alıcı bir süreçti; veriler, genellikle profesyonel işleme yazılımlarına ve cihazlara bağlı olarak işlenirdi [2]. Ancak, teknolojik gelişmelerle birlikte internet tabanlı çözümler yaygınlaşarak veri değerlendirme hizmetleri ile değerlendirme sonuçlarını daha geniş kitlelere sunmaya başladı. Kanada Ulusal Kaynaklar Kurumu (Natural Resources Canada) tarafından sunulan CSRS-PPP gibi sistemler, çevrimiçi işleme çözümleriyle GNSS verilerinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar [3]. Günümüzde CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX vb. internet tabanlı GNSS yazılımları, özellikle akademik araştırmalar, jeodezi, tarım, inşaat ve mühendislik alanlarında konumlama

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gizemkisaaga@ohu.edu.tr (M. G. Gümüş)
Geliş / Received: 26.11.2024 Kabul / Accepted: 25.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1591690

doğruluğunu artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, kullanıcı dostu arayüzleri ve gelişmiş veri işleme algoritmaları sayesinde GNSS verilerini çevrimiçi olarak işleyebilmekte, metreden milimetre seviyesine kadar yüksek doğruluk sağlamaktadır [4,5]. Gelecekte ise, GNSS yazılımlarının daha da gelişerek gerçek zamanlı veri işleme, çoklu uydu sistemi entegrasyonu ve yapay zeka destekli veri analizleri gibi özellikleri barındırması beklenmektedir. Özellikle, artan uydu sayısı ve yeni nesil uydu sistemlerinin devreye girmesiyle, bu yazılımlar kullanıcılara daha fazla hassasiyet ve doğruluk sağlayacaktır [6].

Türkiye'de ve dünyada internet tabanlı veri değerlendirme servisleri kullanılarak çeşitli akademik çalışmalar, yüksek doğruluk gerektiren literatürde önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalar arasında, Diouf, Ndiaye ve Morel [7] çalışmasında, çevrimiçi GNSS hesaplama araçları ve RTKLIB kullanarak yapılan hassas nokta konumlandırma (PPP) ve diferansiyel çözümler karşılaştırılmıştır. Çalışma, CSRS-PPP, CenterPoint RTX Post-Processing (veri değerlendirme) (RTX), Magic/GNSS, Institut Geographique National-PPP (IGN-PPP) ve RTKLIB araçlarının, 24 saatlik veya 6 saatlik gözlem sürelerinde Uluslararası Kara Referans Çerçevesi (ITRF) çözümleriyle karşılaştırıldığında benzer performans seviyeleri sergilediğini göstermektedir. Elrewiny, Zarzoura ve El-Mewafi [8] çalışmasında, gerçek zamanlı PPP tekniği incelenmiş ve bu yöntemin yüksek doğruluk, hızlı karar alma ve çevrimiçi GNSS işleme servisleriyle kolay etkileşim gibi avantajları vurgulanmıştır. Çalışma, çeşitli platformların (CSRS-PPP, AUSPOS, Magic-GNSS, Trimble ve PPP-MANS) gerçek zamanlı PPP performansını artırma potansiyelini ele alırken, PPP-MANS yazılımının %30 oranında bir konumlandırma iyileşmesi sağladığını ortaya koymuştur El Shouny ve Miky [9] çalışmasında, çevrimiçi GNSS işleme servislerinin doğruluk değerlendirmesi yapılmış ve AUSPOS, OPUS, APPS, GAPS, Trimble RTX ve CSRS-PPP gibi popüler servisler karşılaştırılmıştır. Çalışma, bu servislerin geleneksel relatif konumlandırma yöntemine kıyasla daha basit, maliyet etkin ve zaman tasarrufu sağladığını göstermiştir. Sonuçlar, bu servislerin, geleneksel yöntemle kıyaslandığında yaklaşık %75 zaman tasarrufu sağladığını ve genellikle santimetre veya desimetre seviyesinde doğruluk elde ettiğini ortaya koymuştur. En düşük sapma CSRS-PPP servisi ile elde edilirken, en yüksek sapma APPS servisi ile gözlemlenmiştir. İnyurt ve Ulukavak [10] çalışmalarında CSRS-PPP ve Trimble RTX servislerini Türkiye'deki ANKR, ANTL, IZMI, SINP ve VAN1 istasyonlarından elde edilen verilerle test etmiş, CSRS-PPP'nin yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. Alçay ve İmren [11] ise OPUS ve AUSPOS servislerinin farklı gözlem süreleri için doğruluk performansını inceleyerek 24 saatlik gözlemlerde yüksek doğruluk elde edildiğini belirtmiştir. Yaşar ve Eyübagil [12], Gölyaka-Düzce depreminin TUSAGA-Aktif istasyonlarına etkisini inceleyerek CSRS-PPP, PRIDE PPP-AR ve GAMIT/TRACK yazılımları kullanmış ve deprem sonrası yer değiştirme analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, Düzce (DUZC) istasyonunda 8.2 cm yatay, 6.5 cm düşey yer değiştirme gözlemlenirken, Bolu (BOLU) istasyonunda 4.7 cm yatay, 3.2 cm düşey yer

değiştirme tespit edilmiştir. Uçarlı ve Bilgen [13], farklı uydu sistemlerinin otonom araçlardaki konum doğruluğuna etkisini değerlendirmiş, özellikle GALILEO sisteminin çözüme olumlu katkısı olduğunu bulmuştur. Başkan [14] ise Karakoçan ve Halepçe depremlerinin etkilerini AUSPOS servisini kullanarak analiz etmiş, deprem sonrası yer değişimlerini incelemiştir. Alçay ve Atiz [15], BKG Ntrip Client ve RTKLIB yazılımlarını kullanarak gerçek zamanlı PPP yönteminin konum doğruluğunu değerlendirip yatay bileşende ± 10 cm, düşey bileşende ± 20 cm doğruluğa ulaşmıştır. Bülbül vd. [16], mevsimsel değişimlerin PPP konum doğruluğuna etkisini CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS servisleri kullanılarak incelemiş ve en iyi sonuçların MagicGNSS servisi ile elde edildiğini bulmuştur. Özdemir [17] ise CSRS-PPP ve MagicGNSS internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servislerinin farklı gözlem periyotları üzerindeki performansını analiz ederek, 3 saatten uzun sürelerde CSRS-PPP servisinin milimetre seviyesinde doğruluk sağladığını ortaya koymuştur.

Alçay ve Yiğit [18] ise CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS servislerinin statik PPP modüllerini karşılaştırmış ve tüm yazılımların cm seviyesinde doğruluğa ulaştığını, ancak MagicGNSS'in daha hızlı bir çözüm sunduğunu belirtmiştir. Alkan vd. [19] ise GPS ve GLONASS uydularının birlikte kullanıldığında PPP yöntemine göre elde edilen konum doğruluğunu arttırdığını ve özellikle kentsel alanlarda CSRS-PPP servisinin güvenilir bir çözüm sunduğunu vurgulamıştır. Denizcilik uygulamaları kapsamında yapılan çalışmalarda da GNSS servislerinin etkisi ele alınmıştır. Alkan vd. [20] çalışmalarında, Obruk Baraj Gölü'nde yapılan denizcilik ölçümlerinde CSRS-PPP ve MagicGNSS veri değerlendirme servislerini kullanılarak 1-2 dm seviyesinde doğruluk elde etmiştir. Gümüş vd [21] ise, Magic GNSS yazılımı kullanılarak farklı yükseklik açıları ve GNSS günlerinde GPS, GLONASS ve GPS/GLONASS gözlemlerinin etkilerini incelemişlerdir. Farklı yükseklik açıları ve ölçüm günlerine bağlı olarak uydu sayısındaki değişimin ölçüm doğruluğu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Pırtı ve Yazıcı [22] çalışmalarında, AUSPOS, CSRS-PPP ve Trimble RTX servislerini Türkiye'deki ISTA, IZMI ve TUBI istasyonları ile test etmişler ve AUSPOS servisinin genel olarak daha yüksek doğruluk sağladığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında gözlem süresinin doğruluğa etkisini de vurgulayarak 24 saatlik gözlemlerde en yüksek doğruluğa ulaştıklarını ifade etmişlerdir. Ayrıca, Türkiye'de internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri, yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi ve afet analizlerinde yüksek doğruluk sunarak önemli katkılar sağlamaktadır. Örneğin, Şimşek vd. [23] çalışmasında 2011 Van depremi sırasında meydana gelen yatay deformasyonları AUSPOS, OPUS ve CSRS-PPP servislerini kullanarak analiz etmiş ve bu verilerin GAMIT/GLOBK sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Konakoğlu ve Akar [24], Sivrice-Elazığ depreminde TUSAGA-Aktif istasyonlarının hareketlerini OPUS ve AUSPOS ile analiz ederek bu istasyonlarda anlamlı deformasyonlar tespit etmiştir. Baş ve Abbak [25], Ege Denizi'nde 2020 yılında meydana gelen deprem sonrası kabuk deformasyonlarını CSRS-PPP ve OPUS servisleri ile

incelemiş ve İzmir’de kuzey yönünde 57.39 mm’lik bir deformasyon gözlemlenmiştir. Eyübagil vd. [26] ise 2023 Kahramanmaraş depremlerinin jeodezik etkilerini GAMIT/GLOBK ve CSRS-PPP kullanarak değerlendirmiş, deprem anında 440.4 cm’ye varan yer değiştirmeler rapor etmiştir. Demir [27], Trimble RTX kullanarak uydu kombinasyonlarının hız kestirimine olan etkisini incelemiş ve GPS, GLONASS ve Galileo kombinasyonlarının doğruluğu artırdığını ortaya koymuştur. Ek olarak, Demir ve Güneş [28], Alaska’daki deprem sonrası AUSPOS ve OPUS verilerini karşılaştırarak koordinat bileşenlerinde 5-7 cm’lik farkların anlamlı olmadığını bulmuşlardır. Bu çalışmalar, Türkiye’de GNSS yazılımlarının özellikle deprem gibi doğal afetlerde veri doğruluğunu artırarak önemli katkılar sağladığını göstermektedir.

Bu makale, 6 Şubat 2023’te gerçekleşen Kahramanmaraş depremlerinin yer kabuğu hareketleri üzerindeki etkilerini internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servislerini kullanarak analiz etmeyi hedeflemiştir. TUSAGA-Aktif ağdaki 14 sabit istasyon ve depremden en fazla etkilenen EKZ1 istasyonundan elde edilen veriler, CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX servisleri kullanılarak değerlendirilmiştir. X, Y ve Z koordinatlarına yönelik analizlerde parametrik (ANOVA) ve nonparametrik (Kruskal-Wallis) yöntemler kullanılmıştır. Deprem öncesi, sırası ve sonrası dönemlerdeki koordinat değişimleri arasında istatistiksel anlamda farklar tespit edilmiştir. Özellikle Y koordinat ekseninde belirgin yer değişimleri gözlemlenirken, Z koordinat ekseninde boyunca değişiklikler daha sınırlı kalmıştır. EKZ1 istasyonunda saatlik yapılan incelemeler, depremler öncesi, anı ve sonrası dönemdeki hareketlerin farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servislerinin afet sonrası yer hareketlerinin izlenmesinde kullanılabilecek sunduğunu ve etkili bir değerlendirme aracı olduğunu göstermektedir.

2 Materyal ve metod

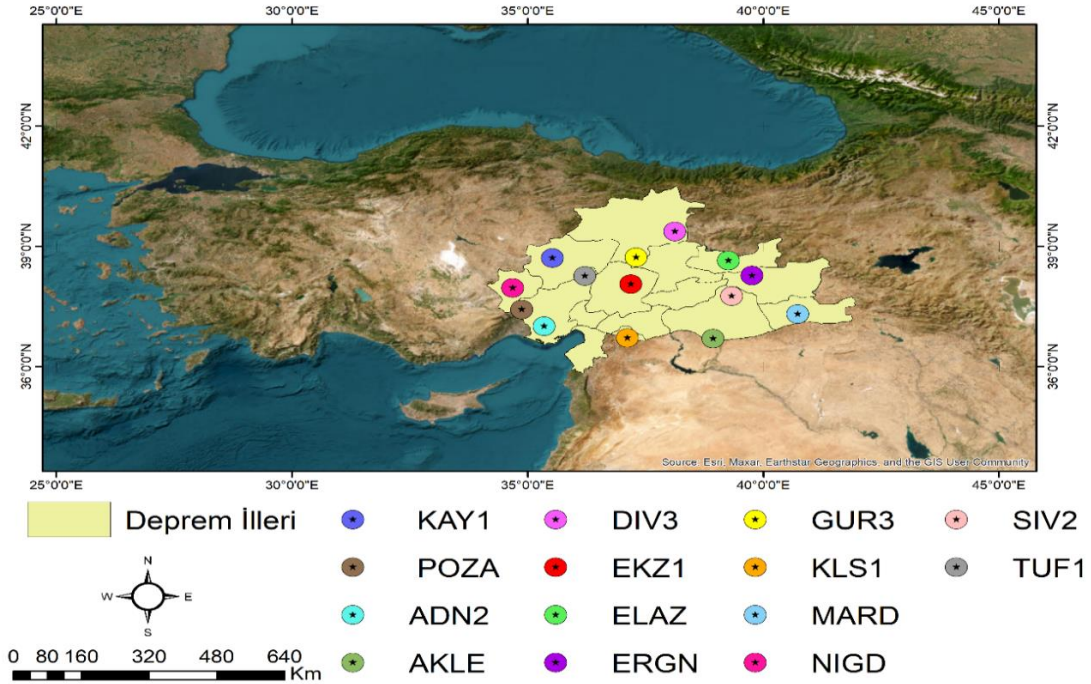
İnternet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri, yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi, deprem vb. afet sonrası veri değerlendirmelerinde yüksek doğruluk sağlayarak bilimsel araştırmalara ve uygulamalara önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca internet üzerinden gerçek zamanlı veri paylaşımı ve analiz imkanı sağlayarak, hem ulusal hem de uluslararası ölçekte yer bilimci araştırmalarına entegre edilebilmekte ve afet sonrası değerlendirme çalışmalarında hızlı ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Bu internet tabanlı GNSS verilerini değerlendirme servislerinden CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning), Kanada’nın doğal kaynaklar alanında faaliyet gösteren resmi kuruluşu tarafından geliştirilmiş olup, yüksek doğrulukta konum bilgisi sağlamak için çift frekanslı GNSS verilerini kullanır. Kullanıcılar bu sistemle, veri değerlendirme yöntemiyle GNSS verilerini işleyerek milimetre seviyesinde doğruluk elde edebilirler [3]. MagicGNSS ise, yüksek doğruluklu uydu verileri ile çok sayıda uygulamada kullanılabilen bir servis olup, özellikle GNSS ağ çözümleri ve yörünge belirleme işlemlerinde tercih edilmektedir [21]. Bu servis, çeşitli hata kaynaklarını minimize ederek konum

doğruluğunu artırır ve internet tabanlı olması sayesinde kullanıcılara geniş bir erişim sağlar [4]. Trimble RTX (Real-Time eXtended), Trimble Inc. tarafından geliştirilen ve yüksek hassasiyetli gerçek zamanlı konumlama imkanı sunan bir yazılımdır. Trimble RTX, çok frekanslı GNSS uydularını kullanarak dünya çapında geniş bir kapsama alanı, daha fazla hassasiyet ve doğruluk sunmaktadır. Bu teknoloji, özellikle zaman ve konum doğruluğunun kritik olduğu tarım, jeodezi ve inşaat vb. sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. CSRS-PPP servisi, GPS ve GLONASS uydu sistemlerinin gözlemlerini kullanırken, MagicGNSS yazılımı bu sistemlere ek olarak Galileo ve BeiDou uydu verilerini de işleyebilmektedir. Trimble RTX ise GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU ve QZSS gibi çok frekanslı GNSS uydularını destekleyerek dünya çapında kapsamlı bir uydu sistemi analizi sağlamaktadır. Bu üç servisin sağladığı doğruluk, işlem hızları ve erişim kolaylıkları, araştırmalarda GNSS verilerinin değerlendirilmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

6 Şubat 2023 tarihinde, Türkiye’nin güneydoğusunda, Kahramanmaraş ve Elbistan merkezli 7.7 ve 7.6 büyüklüğünde iki büyük deprem meydana geldi. İlk deprem sabaha karşı 04:17’de gerçekleşmiş ve Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde ciddi bir enerji boşalmasına yol açmıştır. Bu büyük depremin ardından yalnızca 11 dakika sonra, çok yakın bir bölgede 6.7 büyüklüğünde bir başka deprem daha meydana gelmiştir. İlk gün, özellikle bu iki büyük sarsıntının etkisiyle, bölgedeki yıkım büyük ölçüde artmıştır. Daha sonra ise daha düşük büyüklükte birçok artçı deprem kaydedilmiştir. İkinci büyük deprem saat 13:24’te, 10 kilometre derinlikte ve 7.5 büyüklüğünde meydana gelmiştir. Bu depremden yalnızca iki dakika sonra Malatya merkezli 6.0 büyüklüğünde bir başka sarsıntı yaşanmış, yine aynı gün içinde bu bölgeye yakın yerlerde, 25 dakika içinde 5.8 ve 5.7 büyüklüğünde iki deprem daha olmuştur. Günün son büyük depremi ise saat 15:02’de Maraş-Göksun’da 6.0 büyüklüğünde gerçekleşmiştir. Bu ardışık ve yüksek şiddetteki depremler, bölgedeki hasarın yoğunluğunu daha da artırarak ciddi etkiler bırakmıştır. Tablo 1’de belirtilen depremler, Adıyaman, Hatay, Gaziantep, Kahramanmaraş, Malatya ve Şanlıurfa başta olmak üzere çevredeki birçok ili kapsayan geniş bir bölgede büyük bir yıkıma neden olmuştur. Binlerce bina tamamen yıkılmış veya ağır hasar görmüştür. Depremler sonucunda resmi kayıtlara göre on binlerce kişi yaşamını yitirirken, yüz binden fazla kişi yaralanmış, milyonlarca insan evsiz kalmıştır. Bu felaket, Türkiye’nin yakın tarihindeki en yıkıcı depremlerinden biri olarak kayıtlara geçmiş ve hem ulusal hem de uluslararası düzeyde büyük bir yardım seferberliğine yol açmıştır.

Tablo 1. Türkiye’deki 6 Şubat 2023’te gerçekleşen şiddetli depremler [29]

Merkez Üssü (İl)	Büyüklüğü (MW)	Derinliği (km)	Saati
Kahramanmaraş	7.8	10.0	04.17
Gaziantep	6.7	9.8	04.28
Kahramanmaraş	7.5	7.4	13.24
Malatya	6.0	10.0	13.26
Malatya	5.8	10.0	13.35
Malatya	5.7	10.0	13.51
Kahramanmaraş	6.0	8.5	15.02



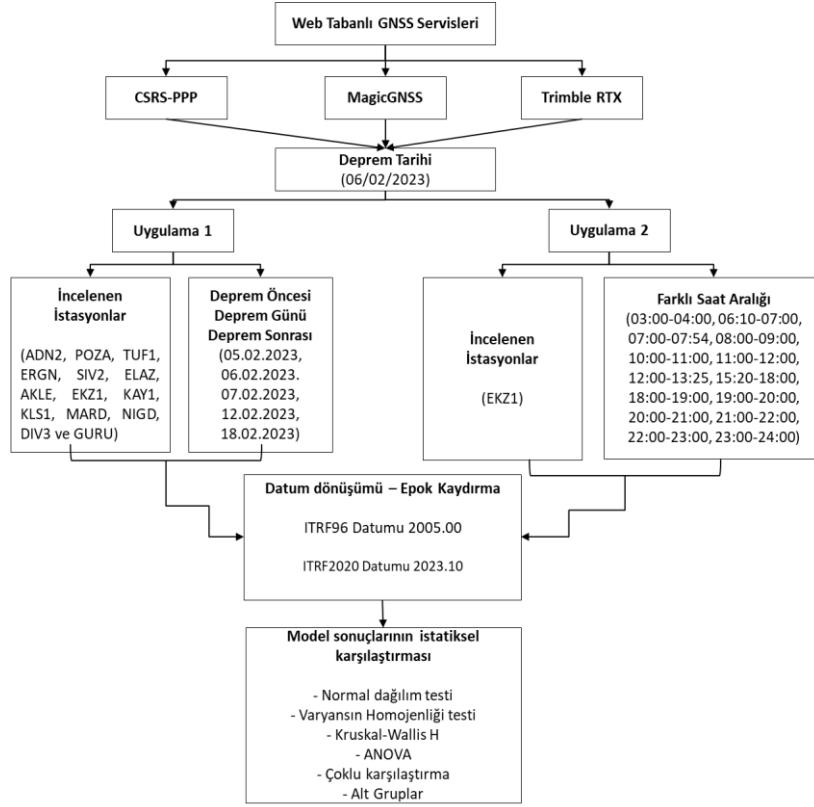
Bu çalışma, internet tabanlı GNSS değerlendirme servislerini kullanarak, 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye’de meydana gelen deprem felaketinin konumsal etkilerini istatistiksel olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. GNSS gözlem verilerinin işlenmesinde internet tabanlı CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX GNSS değerlendirme servisleri kullanılarak 2 farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulama olarak 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye’de yaşanan deprem bölgesinde yer alan TUSAGA-Aktif ağına ait 14 sabit istasyondan (ADN2, POZA, TUF1, ERGN, SIV1, ELAZ, ANTE, EKZ1, KAY1, KLS1, MARD, NIGD, DIV2 ve GURU) farklı günlerde (05.02.2023, 06.02.2023, 07.02.2023, 12.02.2023 ve 18.02.2023) yani deprem öncesi, deprem günü ve deprem sonrası kapsayan günlerde elde edilen GNSS verileri, İnternet tabanlı CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX GNSS yazılımları ile analiz edilmiştir (Şekil 1).

Bunun yanı sıra, ikinci uygulama olarak depremden en fazla etkilenen istasyonlardan biri olan Türkiye’deki TUSAGA-Aktif ağına ait EKZ1 sabit istasyonundan elde edilen gözlem verileri, 6 Şubat 2023 gününü kapsayan farklı saat aralıklarında (03:00-04:00, 06:10-07:00, 07:00-07:54, 08:00-09:00, 10:00-11:00, 11:00-12:00, 12:00-13:25, 15:20-18:00, 18:00-19:00, 19:00-20:00, 20:00-21:00, 21:00-22:00, 22:00-23:00, 23:00-24:00) analiz edilmiştir. Bu saat aralıkları, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen ve büyüklüğü 5.5 şiddetinden büyük olan depremlerin gerçekleştiği saatlere göre belirlenmiştir (Tablo 1’de belirtilmiştir). Bu analizlerde, internet tabanlı GNSS değerlendirme yazılımlarının performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve farklı zamanlarda meydana gelen depremlerin farklı saat aralıklarında EKZ1 istasyonunun konumu üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde

değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, gerçekleştirilen her iki uygulama için bir iş akışı Şekil 2’de verilmiştir.

Bu çalışmada, TUSAGA-Aktif ağındaki istasyonların ITRF96 Datumu 2005.00 referans epogu Kartezyen koordinatları ve hız vektörleri internet sayfasından alınmıştır [30]. Bu istasyonların kartezyen koordinatları ITRF2014 Datumu ve 2023.10 ölçü epoguna dönüştürülmüştür. Bu çalışmada dönüştürülen koordinatlar gerçek değer olarak kabul edilmiştir. Bu koordinatlar, internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri ile elde edilen kartezyen koordinatlara ile karşılaştırılarak her bir istasyon için koordinat farkları bulunmuştur. Bu sayede analizler, aynı datum ve ölçü epogu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu datum ve epok kaydırma işlemleri EUREF internet sayfası kullanılarak gerçekleştirilmiştir [31].

Bu makale kapsamında yapılan uygulamalarda, farklı GNSS değerlendirme servislerine, farklı gün ve saat aralıklarına göre X, Y ve Z koordinatları göre elde edilen konumsal farklılıkları istatistiksel olarak analiz etmek için hem parametrik hem de nonparametrik yöntemler uygulanmıştır. Verilerin normal dağılım varsayımını sağladığı durumlarda, gruplar arasındaki varyansların anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi kullanılmıştır. ANOVA, veriler normal dağılım gösterdiğinde ve grup varyanslarının homojen olduğu varsayımı altında, farklı grup ortalamalarının karşılaştırılmasına imkan tanır [32]. Bu yöntem, özellikle iki veya daha fazla grubun ortalamaları arasında anlamlı fark olup olmadığını test etmek için yaygın olarak tercih edilmektedir [33]. Verilerin normal dağılım göstermediği veya varyansların eşit olmadığı durumlarda ise Kruskal-Wallis H testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis testi, parametrik test varsayımlarını sağlamayan durumlarda



Şekil 2. Uygulama iş akışı

kullanılan nonparametrik bir yöntem olup, sıralı veriler üzerinden gruplar arasındaki farklılıkları analiz eder [34]. Özellikle, çok sayıda grubun ortancalarını karşılaştırmak için uygun bir yöntem olarak öne çıkan Kruskal-Wallis testi, verilerin sıralanması ve sıralı veriler üzerinden gruplar arası farkların anlamlı olup olmadığının değerlendirilmesini sağlar [35]. Parametrik ve parametrik olmayan testlerin birlikte kullanılması, sonuçların yorumlanabilirliğini artırır. Eğer ANOVA anlamlı bir fark bulur ve Kruskal-Wallis bu sonucu doğrularsa, analiz güvenilir bir temele dayanır. Ancak, ANOVA anlamlı sonuç verirken Kruskal-Wallis anlamlı sonuç vermezse, bu durum verilerin parametrik varsayımları ihlal ettiğini gösterebilir. Kruskal-Wallis ve ANOVA testlerinin birlikte kullanılması, istatistiksel analizlerde sağlamlık ve geçerlilik sağlamak için mantıklı bir yaklaşımdır. Bu çalışmada bu yüzden Kruskal-Wallis ve ANOVA testi sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, veriler üzerinde hem ANOVA hem de Kruskal-Wallis testi uygulanarak elde edilen ve verilerin dağılımına uygun olarak en doğru sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Analizlerde, X, Y ve Z koordinat eksenlerindeki farklar bağımlı değişken olarak ele alınmıştır. Farklı günler, farklı saat aralıkları ve farklı internet tabanlı GNSS değerlendirme servisleri bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Bu değişkenler ve alt gruplar temel alınarak yapılan analizlerle, farklı gün, saat aralığı ve farklı GNSS servislerine göre bulunan koordinat farkları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı belirlenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, ilk olarak CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX servisleri kullanılarak TUSAGA-Aktif ağına ait 14 sabit istasyonundan (ADN2, POZA, TUF1, ERGN, SIV1, ELAZ, ANTE, EKZ1, KAY1, KLS1, MARD, NIGD, DIV2 ve GURU) elde edilen farklı günlere (05.02.2023, 06.02.2023, 07.02.2023, 12.02.2023 ve 18.02.2023) ait X, Y ve Z koordinat farkları arasında istatistiksel anlamda belirgin bir fark olup olmadığı hem parametrik hem de nonparametrik yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. İkinci olarak 06.02.2023 tarihinde meydana gelen depremden en çok etkilenen TUSAGA-Aktif ağına bağlı sabit EKZ1 İstasyonu'ndan, farklı saat dilimlerinde (03:00-04:00, 06:10-07:00, 07:00-07:54, 08:00-09:00, 10:00-11:00, 11:00-12:00, 12:00-13:25, 17:20-18:00, 18:00-19:00, 19:00-20:00, 20:00-21:00, 21:00-22:00, 22:00-23:00, 23:00-24:00) GNSS gözlem verileri yine bu internet tabanlı GNSS servisleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Böylece, farklı zaman aralıklarına göre internet tabanlı GNSS değerlendirme servislerinin performansı incelenmiş ve depremin EKZ1 İstasyonu'nun konumundaki etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu makalede bu iki uygulamada bulunan konumsal farklılıklar arasında eğer istatistiksel anlamda belirgin bir fark tespit edilmişse, bu farkın hangi parametreler arasında olduğu detaylı bir şekilde istatistiksel olarak açıklanmıştır.

Bu çalışmada, standart sapma verilerin genel dağılımını ve varyansını daha kapsamlı bir şekilde temsil etmesi, farklı internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri ile elde

edilen sonuçların karşılaştırılmasını kolaylaştırması ve istatistiksel analizin tutarlılığını artırması nedeniyle tercih edilmiştir. İlk uygulama için internet tabanlı GNSS servislerine, deprem öncesi ve sonrasında kapsayan farklı günlere ve deprem bölgesinde yer alan 14 sabit TUSAGA-Aktif GNSS istasyonuna göre elde edilen X, Y ve Z koordinat farklarından standart sapma değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3). Ayrıca farklı değişkenlere ait elde edilen X, Y ve Z koordinat farklarının normal dağılıma sahip olup olmadığı ve grup varyanslarının homojenliği sağlayıp sağlamadığı istatistiksel olarak değerlendirilerek Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Şekil 3'e göre, farklı GNSS değerlendirme servislerinin performansı X, Y ve Z koordinat bileşenleri için konumsal farkların standart sapma değerleri üzerinden incelenmiştir (Sol Üst). Trimble RTX, özellikle Y koordinat eksenini bileşenlerinde diğer GNSS servislerine kıyasla daha yüksek standart sapma değerleri göstermiştir. Bu durum, Trimble RTX'in X ve Y koordinat eksenleri boyunca hareketlerin değerlendirilmesi açısından diğer servislerle karşılaştırıldığında daha düşük doğrulukta sonuçlar ürettiğini göstermektedir. CSRS-PPP servisi ise özellikle X koordinat eksenini bileşeninde en düşük standart sapma değerlerine sahip olarak, daha stabil ve güvenilir sonuçlar sunduğunu göstermiştir. Z koordinat eksenini bileşeni açısından ise tüm servislerin düşük standart sapma değerleri sağladığı, dolayısıyla servisler arasında daha tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Deprem öncesi, deprem günü ve deprem sonrasında kapsayan farklı tarihlerde elde edilen standart sapma değerleri, deprem etkilerinin zaman içerisindeki

değişimini ortaya koymaktadır (Sağ Üst). 12 Şubat 2023'te Y koordinat eksenini bileşeninde en yüksek standart sapma değerleri tespit edilmiştir. Bu durum, Y koordinat eksenini boyunca meydana gelen yer hareketlerinin depremlerin etkisiyle önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. 7 Şubat 2023'te Z koordinat eksenini bileşeninde kaydedilen yüksek standart sapma değerleri ise bu eksen üzerindeki hareketlerin bu dönemde daha belirgin hale geldiğine işaret etmektedir. Bu durum, artçı sarsıntılar ya da bölgesel yerleşme süreçleriyle ilişkilendirilebilir. 18 Şubat 2023 itibarıyla bütün koordinat eksenleri yönünde standart sapma değerlerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu da depremin etkilerinin azaldığını ya da istasyonların konumsal olarak daha kararlı hale geldiğini göstermektedir. Genel olarak, Y koordinat eksenini bileşeninde diğer bileşenlere kıyasla daha yüksek standart sapma değerleri görülmesi, yer değiştirmelerin deprem sırasında daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. TUSAGA-Aktif ağına ait 14 sabit istasyonundan elde edilen standart sapma değerleri, depremin coğrafi dağılımını ve şiddeti hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Alt Orta). EKZ1 istasyonu, özellikle Y koordinat eksenini bileşeninde 1.5 metreyi aşan standart sapma ile en çok etkilenen istasyon olarak öne çıkmıştır ve bölgede Y koordinat eksenini boyunca büyük hareketler yaşandığını göstermektedir. ANTE, ELAZ ve SIVL istasyonlarında daha düşük ancak belirgin etkiler gözlemlenirken, deprem bölgesinden uzak olan NIGD, DIV2 ve GURU istasyonlarında standart sapma değerleri oldukça düşük kalmıştır. Bu durum, depremin etkisinin mesafeye bağlı olarak azaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Farklı GNSS değerlendirme servisleri (sol üst), farklı günler (sağ üst) ve farklı istasyonlara (alt orta) göre elde edilen standart sapma değerleri (m).

Tablolarda farklı değişkenlere göre elde edilen değerlerinin varyans homojenliği ve normal dağılım testlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, X, Y ve Z koordinat eksenleri boyunca bulunan değerlerin bu tablonun Sig. Sütunundaki değerlerin 0.05'ten küçük olması nedeni ile normal dağılımlı olmadığı belirlenmiştir. Yine X, Y ve Z koordinat eksenleri boyunca bulunan değerlerin GNSS servisleri hariç varyansların homojen olmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, normal dağılım ve varyans

homojenliği durumlarına bağlı olarak istatistiksel karşılaştırmaların Kruskal-Wallis H Testi ile yapılması gerekir. Ancak, veri analizinde normal dağılım ve varyans homojenliğinin olası yanıltıcı etkileri göz önünde bulundurularak, bu çalışmada farklı GNSS değerlendirme yazılımlarına ve farklı günlere (deprem öncesi, deprem günü ve deprem sonrası) hem Kruskal-Wallis H Testi hem de ANOVA uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar **Tablo 4** ve **5**'te verilmiştir.

Tablo 2. Bütün istasyonlardaki farklı değişkenlere göre elde edilen Normal Dağılım Testi

Değişkenler	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	İstatistik	df	Sig.	İstatistik	df	Sig.
X	.394	528	.000	.427	528	.000
Y	.421	528	.000	.396	528	.000
Z	.265	528	.000	.640	528	.000

a: Lilliefors Anlamlılık Düzeltmesi, df: serbestlik derecesi, Sig.: olasılık değeridir (p-değeri).

Tablo 3. Bütün istasyonlardaki farklı değişkenlere göre elde edilen Varyans Homojenliği Testi

Değişkenler	GNSS Servisleri				Günler				İstasyonlar			
	Levene İstatistik	df1	df2	Sig.	Levene İstatistik	df1	df2	Sig.	Levene İstatistik	df1	df2	Sig.
X	0.306	2	525	.736	7.868	4	523	.000	18.196	13	514	.000
Y	0.319	2	525	.727	7.928	4	523	.000	19.248	13	514	.000
Z	0.398	2	525	.672	17.632	4	523	.000	4.834	13	514	.000

Tablo 4. Farklı GNSS değerlendirme servisleri ve farklı günlere göre gerçekleştirilen ANOVA değerleri

Değişkenler		GNSS Servisleri				Günler					
		Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Sig.	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Sig.
X	Gruplar Arası	0.309	2	0.154	0.140	0.869	33.177	4	8.294	107.490	.000
	Gruplar İçi	35.183	32	1.099			2.315	30	0.077		
	Toplam	35.492	34				35.492	34			
Y	Gruplar Arası	1.392	2	0.696	0.252	0.778	81.899	4	20.475	79.977	.000
	Gruplar İçi	88.188	32	2.756			7.680	30	0.256		
	Toplam	89.580	34				89.580	34			
Z	Gruplar Arası	0.012	2	0.006	0.214	0.809	0.694	4	0.174	28.979	.000
	Gruplar İçi	0.862	32	0.027			0.180	30	0.006		
	Toplam	0.874	34				0.874	34			

Tablo 5. Farklı GNSS değerlendirme servisleri ve farklı günlere göre gerçekleştirilen KRUSKAL-WALLİS değerleri

Değişkenler		GNSS Servisleri				Günler			
		N	Chi-Square	df	Sig.	N	Chi-Square	df	Sig.
X	Gruplar Arası	35	0.074	2	0.964	35	26.318	4	0.000
Y	Gruplar Arası	35	0.387	2	0.824	35	26.377	4	0.000
Z	Gruplar Arası	35	1.019	2	0.601	35	27.418	4	0.000

Tablo 6. X koordinat eksenleri boyunca elde edilen farklı günlere göre elde edilen ikili karşılaştırmalar.

Bağımlı Değişken: X		Günler - Çoklu Karşılaştırmalar (Tamhane)				
(I) Günler	(J) Günler	Ortalama Fark(I-J)	Std. Sapma	Sig.	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
05.02.2023	06.02.2023	1.513968*	0.235	0.007	0.506	2.522
	07.02.2023	2.488934*	0.006	0	2.467	2.511
	12.02.2023	2.486891*	0.006	0	2.466	2.508
	18.02.2023	2.486564*	0.006	0	2.466	2.507
06.02.2023	05.02.2023	-1.513968*	0.235	0.007	-2.522	-0.506
07.02.2023	05.02.2023	-2.488934*	0.006	0	-2.511	-2.467
12.02.2023	05.02.2023	-2.486891*	0.006	0	-2.508	-2.466
18.02.2023	05.02.2023	-2.486564*	0.006	0	-2.507	-2.466

Tablo 4 ve 5 incelendiğinde, internet tabanlı GNSS servislerin değerlendirmelerinden ve deprem öncesi ve sonrasını kapsayan farklı günlere göre elde edilen koordinat farklarının Kruskal-Wallis H Testi veya ANOVA testi sonuçları görülmektedir. Bu değişken gruplarına ait ortalamalar birlikte değerlendirildiğinde tablolardaki Sig. sütunundaki değer 0.05'ten küçük olduğu değerler görülmektedir. Kruskal-Wallis H Testi ve ANOVA testi sonuçlarına göre GNSS değerlendirme servisleri ve deprem öncesi ve sonrasını kapsayan günlerin, X, Y ve Z değişkenleri üzerindeki etkileri farklılık göstermektedir. Her iki test sonuçları GNSS servisleri açısından incelendiğinde, X, Y ve Z koordinat değişkenlerinde anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu durum, İnternet tabanlı GNSS servislerinden farklı konfigürasyonlara göre elde edilen X, Y ve Z koordinatları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Farklı GNSS servisleri kullanılarak yapılan çözümlerin, bu uygulamadaki GNSS istasyonlarının koordinat değerlerini önemli ölçüde değiştirmediği sonucuna ulaşılabilir. Deprem öncesi ve sonrasını kapsayan farklı günlerin X, Y ve Z değişkenleri üzerindeki etkisi belirlemek üzere yapılan Kruskal-Wallis H Testi veya ANOVA testi sonuçlarına göre istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar bulunmuştur. Özellikle X ve Y koordinat eksenleri boyunca bu etki oldukça güçlüdür. Bu sonuçlar, 06 Şubat 2023 Günü yaşanan depremin, konumsal farklılıklar üzerinde önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, bu sonucun potansiyel nedenlerinin detaylı bir şekilde istatistiksel bir inceleme yapılmaya çalışılmıştır. Bunun için 6 Şubat 2023 gününde olan depremlerin etkilerini incelemek için EKZ1 istasyonunda (en fazla değişim olduğu nokta) o günü kapsayan farklı saat aralıklarını kapsayan konumsal karşılaştırmalar yapılmıştır.

Fakat, Kruskal-Wallis H Testi veya ANOVA testi sonuçları bu farklılıkların deprem öncesi ve sonrasını kapsayan hangi günler arasında olduğuna ilişkin bilgi içermez. Bunun için konumsal farklılıkların hangi günler arasında olduğunun belirlenmesi için çoklu karşılaştırmalar

(Post Hoc Test) yapılmıştır. Bunun için analiz yaptığımız veriler normal dağılım gösteriyor ve varyanslar homojen ise Tukey testi, bu koşullar sağlanmadığında ise Tamhane's T2 testi tercih edilmesi gerekir. GNSS değerlendirme servisleri ile elde edilen koordinatlar arasında anlamlı bir fark olmadığı için ikili karşılaştırma sonuçları verilmemiştir. Bu çalışmada, ikili karşılaştırma sonuçları çok uzun olduğu için örnek olarak sadece deprem öncesi (5.2.2023) ve deprem sonrasını kapsayan günler için X koordinat eksenini boyunca elde edilen Tamhane's T2 testine göre bulunan ikili karşılaştırma sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6 incelendiğinde, X koordinat eksenleri boyunca farklı günlerde elde edilen sonuçlar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar tespit edilmiştir. X koordinat eksenleri yönünde deprem öncesini kapsayan 05.02.2023 tarihi, deprem günü ve deprem sonrası diğer günlerden belirgin bir şekilde farklılaşmaktadır. Özellikle deprem öncesi ile deprem sonrasını kapsayan 07.02.2023, 12.02.2023 ve 18.02.2023 tarihleri ile yapılan karşılaştırmalarda ortalama farklar oldukça yüksek (yaklaşık 2.48) ve istatistiksel olarak anlamlıdır. Yine deprem öncesi (05.02.2023) ve deprem günü (06.02.2023) tarihleri arasındaki karşılaştırmalarda ortalama farklar (yaklaşık 1.51) diğer günlere göre daha azdır. X koordinat eksenine göre elde edilen koordinat farklarının zaman içinde anlamlı bir değişim gösterdiğini ve bu değişimin özellikle 5.2.2023 tarihi ile diğer günler arasında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Deprem öncesi, deprem günü ve deprem sonrası tarihlerde elde edilen farklılıkların 6 Şubat 2023 tarihinde olan ve sonrasında devam eden artçı depremlerin konumsal etkileri bu analizlerde görülmüştür.

Ayrıca, farklı GNSS değerlendirme servisleri ile deprem öncesi, deprem günü ve deprem sonrasını kapsayan çeşitli günlerde elde edilen X, Y ve Z koordinatlarına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 7 ve 8'de, GNSS değerlendirme servisleri ve farklı günlere göre elde edilen sonuçlar arasındaki benzerlikleri belirlemek ve istatistiksel karşılaştırmalar yapmak için alt gruplar oluşturulmuştur.

Tablo 7. Farklı GNSS değerlendirme servislerine göre oluşturulan alt gruplar

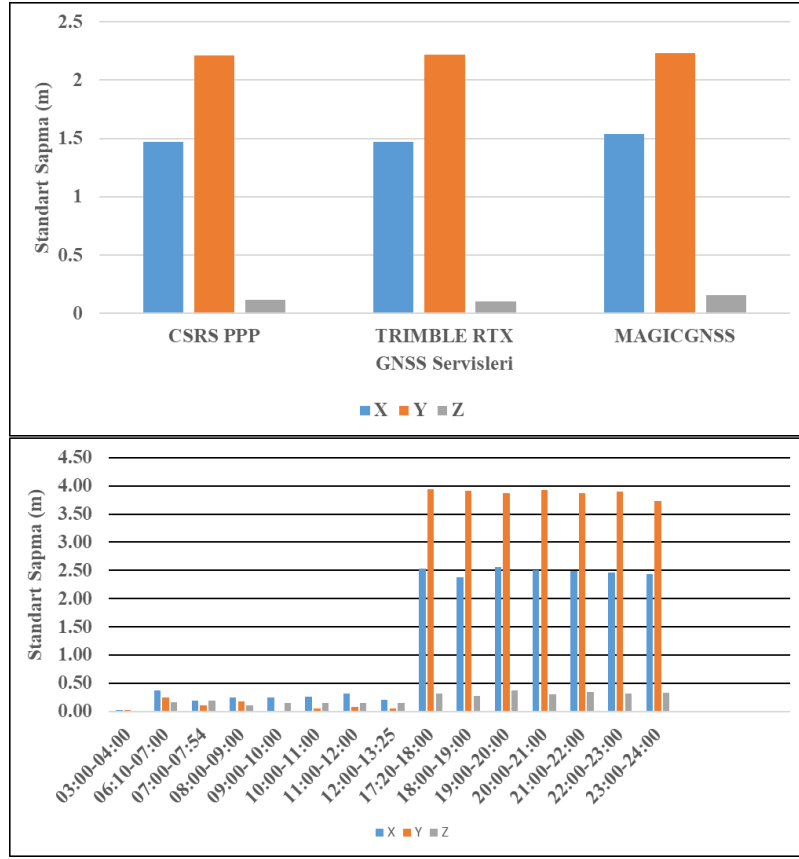
GNSS Servisleri – Alt küme için ($\alpha = 0.05$)						
GNSS SERVİSİ	X		Y		Z	
	N	1	N	1	N	1
TRİMBLE RTX	5	-1.859	5	2.918	5	-0.228
MAGİCGNSS	25	-1.832	25	2.994	25	-0.189
CSRS-PPP	5	-1.569	5	2.416	5	-0.160
Sig.		0.867		0.798		0.731

Tablo 8. Farklı günlere göre oluşturulan alt gruplar.

GÜNLER	X			GÜNLER	Y			GÜNLER	Z				
	N	1	2		3	N	1		2	N	1	2	
07.02.2023	7	-2.492			05.02.2023	7	-0.023			07.02.2023	7	-0.316	
12.02.2023	7	-2.490			06.02.2023	7		2.756		12.02.2023	7	-0.305	
18.02.2023	7	-2.490			07.02.2023	7			3.920	18.02.2023	7	-0.295	
06.02.2023	7		-1.517		18.02.2023	7			3.923	06.02.2023	7	-0.031	
05.02.2023	7			-0.003	12.02.2023	7			3.925	05.02.2023	7	-0.006	
Sig.		1.000	1.000	1.000	Sig.		1.000	1.000	1.000	Sig.		0.988	0.972

Tablo 7 incelendiğinde farklı GNSS değerlendirme servislerine bağlı olarak oluşturulan alt gruplarda istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulunmamıştır. Trimble RTX, MagicGNSS ve CSRS-PPP servisleri kullanılarak yapılan değerlendirmeler sonucu bulunan X, Y ve Z koordinatlarında tek alt grup oluşturulduğu için benzer sonuçlar sergilediği görülmektedir. Koordinat değerleri arasında küçük farklılıklar olmasına rağmen, bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı değildir. Dolayısıyla, GNSS servisleri arasında değerlendirme sonuçlarının genel olarak uyumlu olduğu söylenebilir. Özellikle Y koordinatındaki değerlerin diğer eksenlere kıyasla daha yüksek olduğu, ancak bu artışın da GNSS servisleri arasında anlamlı bir farklılık yaratmadığı görülmektedir. Tablo 8 incelendiğinde ise X ve Y koordinat eksenleri boyunca elde edilen ortalama farklılıklara göre elde edilen sonuçlar 3 alt gruba ayrılmıştır. Bu alt gruplar incelendiğinde deprem öncesi, deprem günü ve deprem sonrası elde edilen değerlerin istatistiksel olarak farklılaştığı sonucuna ulaşılmıştır. Z koordinat eksenini yönünde elde edilen ortalama farklılıkların 2 alt gruba ayrıldığı görülmektedir. Tarihler incelendiğinde deprem öncesi ve deprem sonrası olarak elde edilen sonuçların farklılaştığı görülmektedir. Ayrıca Z koordinat eksenini boyunca olan konumsal değişimlerin diğer X ve Y koordinat eksenlerine göre bulunan sonuçlara göre daha az ortalamaya sahip olduğu görülmektedir.

İkinci uygulama olarak TUSAGA-Aktif ağında bulunan ve depremden en çok etkilenen sabit EKZ1 İstasyonundan farklı veri saat aralığında (03:00-04:00, 06:10-07:00, 07:00-07:54, 08:00-09:00, 10:00-11:00, 11:00-12:00, 12:00-13:25, 17:20-18:00, 18:00-19:00, 19:00-20:00, 20:00-21:00, 21:00-22:00, 22:00-23:00, 23:00-24:00) elde edilen gözlem verileri internet tabanlı GNSS veri değerlendirme hizmetlerinden CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX yazılımları ile test edilmiştir. Fakat, bu değerlendirmelerde 13:25-17:20 aralığında gözlem verisi olmadığı için değerlendirme yapılamamıştır. Böylelikle internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servislerinin performansı analiz edilerek veri saat aralığına göre depremin EKZ1 İstasyonunun konumu üzerinde yaratmış olduğu etki ortaya konmaya çalışılmıştır. EKZ1 İstasyonunun ITRF96 Datumu 2005.00 referans epöğü koordinatları ve hız vektörleri gerçek değer olarak kullanılmıştır. EKZ1 İstasyonunun kartezyen koordinatları ITRF2020 Datumu 2023.10 ölçü epöğuna dönüştürülmüştür. Bu şekilde, internet tabanlı yazılımlardan elde edilen sonuçlar ile yapılan karşılaştırmalar aynı datum ve epöğ göre yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucu elde edilen farklı GNSS değerlendirme servisleri ve farklı veri saat aralığına göre elde edilen standart sapma değerleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Farklı GNSS değerlendirme servisleri, farklı günler ve farklı istasyonlara göre elde edilen standart sapma değerleri (m).

Ayrıca, farklı veri saat aralığına göre farklı internet tabanlı GNSS değerlendirme servislerine dayalı olarak bulunan koordinatlar ile gerçek değerler arasındaki farkların, parametrik ve nonparametrik yöntemlerle istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı araştırılmıştır. Bu analizlerde, X, Y ve Z koordinat eksenlerindeki farklar bağımlı değişken olarak ele alınmış, farklı veri saat periyotları ve farklı yazılımlar ise bağımsız değişkenler olarak incelenmiştir. Bu bağımlı ve bağımsız parametreler ve alt gruplara göre analizler yapılarak, çeşitli saat aralıklarına ve farklı yazılımlara bağlı olarak bulunan koordinat farkları arasında istatistiksel anlamda önemli bir fark olup olmadığı tespit edilmiştir. Her bir test edilecek grubun normal dağılıma sahip olup olmadığı ve grup varyanslarının homojen olup olmadığını gösteren istatistiksel sonuçlar Tablo 9 ve 10'da verilmiştir.

Tablo 9. Farklı değişkenlere göre elde edilen Normal Dağılım Testi

Değişkenler	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	İstatistik	df	Sig.	İstatistik	df	Sig.
X	0.329	45	0.000	0.683	45	0.000
Y	0.341	45	0.000	0.671	45	0.000
Z	0.257	45	0.000	0.774	45	0.000

a: Lilliefors Anlamlılık Düzeltmesi, df: serbestlik derecesi, Sig.: olasılık değeridir (p-değeri).

Tablo 10. Farklı değişkenlere göre elde edilen Varyans Homojenliği Testi

Değişkenler	GNSS Servisleri				Veri Saat Aralığı			
	Levene İstatistik	df1	df2	Sig.	Levene İstatistik	df1	df2	Sig.
X	0.074	2	42	0.929	4.052	14	30	0.001
Y	0.028	2	42	0.972	7.362	14	30	0.000
Z	0.055	2	42	0.947	4.073	14	30	0.001

Yukarıda tablolardaki Sig. değerleri, 0.05'ten küçük olduğu durumlarda, verilerin normal dağılım göstermediği ve varyans homojenliğini sağlamadığı anlamı taşımaktadır. Farklı GNSS değerlendirme servislerine göre verilerin varyans homojenliği sağlansa da bu durum tek başına parametrik testlerin uygulanması için yeterli değildir. Bu durumda, değişkenler arasında istatistiksel karşılaştırmalar nonparametrik test olan Kruskal-Wallis testine göre yapılması gerekirken bu çalışmada parametrik test olan ANOVA testi de yapılarak parametrik ve nonparametrik testler arasındaki sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. EKZ1 İstasyonu için aşağıda sunulan Tablo 11 ve 12 ANOVA ve Kruskal-Wallis testleri ile farklı GNSS değerlendirme servisleri ve veri saat aralığına göre bulunan koordinat farkları arasında belirgin bir fark olup olmadığı incelenmiştir.

Tablo 11. Farklı GNSS değerlendirme servisleri ve farklı veri saat aralığına göre gerçekleştirilen ANOVA değerleri.

Değişkenler	GNSS Servisleri					Veri Saat Aralığı					
	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Sig.	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Sig.	
X	Gruplar Arası	0.000	2	0.000	0.000	1.000	58.072	14	4.148	3877.441	0.000
	Gruplar İçi	58.104	42	1.383			0.032	30	0.001		
	Toplam	58.104	44				58.104	44			
Y	Gruplar Arası	0.037	2	0.019	0.005	0.995	166.584	14	11.899	1424.883	0.000
	Gruplar İçi	166.797	42	3.971			0.251	30	0.008		
	Toplam	166.834	44				166.834	44			
Z	Gruplar Arası	0.001	2	0.001	0.010	0.990	2.333	14	0.167	165.946	0.000
	Gruplar İçi	2.362	42	0.056			0.030	30	0.001		
	Toplam	2.363	44				2.363	44			

Tablo 12. Farklı GNSS değerlendirme servisleri ve veri saat aralığına göre gerçekleştirilen Kruskal-Wallis değerleri.

Değişkenler	GNSS Servisleri			Veri Saat Aralığı		
	Chi-Square	df	Sig.	Chi-Square	df	Sig.
X Gruplar Arası	0.126	2	0.939	40.000	14	0.000
Y Gruplar Arası	1.733	2	0.420	36.535	14	0.001
Z Gruplar Arası	1.258	2	0.533	36.825	14	0.001

Yukarıda tablolardaki Sig. değerlerine göre farklı veri saat aralığına göre bulunan ANOVA ve KRUSKAL-WALLİS çizelgeleri gözden geçirildiğinde, yapılan değerlendirmeler sonucunda sadece veri saat aralığındaki değişkenler arasında istatistiksel anlamda önemli farkların bulunduğu saptanmıştır. GNSS değerlendirme servisleri için hem ANOVA sonuçları hem de KRUSKAL-WALLİS sonuçlarına göre istatistiksel anlamda belirgin farklar bulunmamıştır. Bu farkların hangi veri saat aralığında olduğunu belirlemek için ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. İstatistiksel olarak bir fark olmamasına rağmen GNSS servislerine göre yapılan ikili karşılaştırma sonuçları da verilmiştir. Bu çalışmada farklı veri saat aralığına göre elde edilen koordinat farkları, normal dağılım ve varyans homojenliği sağlamadığı için Tamhane testi uygulanmıştır. Fakat farklı parametrelere göre yapılan ikili değerlendirme çizelgeleri çok geniş olduğundan, bu çalışmada farklı veri saat aralığına göre analiz edilen değişkenlerin ikili karşılaştırmalarında yalnızca X koordinat eksenini yönünde (03:00-04:00, 09:00-10:00, 12:00-13:25, 17:20-18:00) bulunan sonuçlar Tablo 13'te örnek olarak sunulmuştur. Farklı GNSS değerlendirme servislerine göre bulunan sonuçlar ise X, Y ve Z koordinat eksenlerine göre Tablo 14'te sunulmuştur.

Tablo 13'te Farklı veri saat aralığına göre elde edilen ikili karşılaştırmalarda bulunan koyu renk ile gösterilen saatler arasında farklılıklar bulunmuştur. EKZ1 İstasyonu için 04:17

saatinde yaşanan deprem öncesi veri setleri değerlendirildiğinde 03:00-04:00 saat aralığında bulunan koordinatlar ile iki büyük deprem sonrası bulunan koordinatlar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir. Yine birinci deprem sonrasında 2. Deprem öncesine kadar geçen saatlerde (06:10-07:00, 07:00-07:54, 08:00-09:00, 09:00-10:00, 10:00-11:00, 11:00-12:00 ve 12:00-13:25) benzer koordinatlar bulunmuştur. Diğer zaman aralıklarında istatistiksel farklılıklar bulunmuştur. İkinci depremden sonra elde edilen sonuçlar ile ikinci depremden önce elde edilen sonuçlar arasında anlamlı farklılıklar görülmüştür. Sonuçları özetlemek gerekirse deprem öncesi elde edilen sonuçlar kendi aralarında, ilk depremden ikinci depreme kadar elde edilen sonuçlar kendi aralarında, ikinci depremden sonra elde edilen sonuçlar da kendi aralarında benzer özellik göstermiştir.

Tablo 14 incelendiğinde farklı internet tabanlı GNSS değerlendirme servislerinden elde edilen koordinatların, parametrik ve nonparametrik yöntemler ile elde edilen sonuçlara göre benzer özellik gösterdiği belirlenmiştir. Yani bu yazılımlardan elde edilen koordinatlar arasında farklı zaman aralığında da olsa istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. Ayrıca, X, Y ve Z koordinat eksenlerinde çeşitli GNSS değerlendirme hizmetlerine ve farklı veri saat aralıklarına göre yapılan değerlendirmelerin sonuçlarını inceleyerek, benzerlikleri ve farklılıkları test etmek için Tablo 15 ve 16'da alt gruplar oluşturulmuştur.

Tablo 13. Farklı veri saat aralığına göre elde edilen ikili karşılaştırmalar

Bağımlı Değişken: X		Veri Saat Aralığı – Çoklu Karşılaştırmalar (Tamhane)					
Veri Saat Aralığı (I)	Veri Saat Aralığı (J)	Ortalama Fark (I-J)	Sig.	Veri Saat Aralığı (I)	Veri Saat Aralığı (J)	Ortalama Fark (I-J)	Sig.
03:00-04:00	06:10-07:00	0.219	0.000	12:00-13:25	03:00-04:00	-0.211	0.000
	07:00-07:54	0.170	0.000		06:10-07:00	0.008	1.000
	08:00-09:00	0.211	0.000		07:00-08:00	-0.042	0.954
	09:00-10:00	0.221	0.000		08:00-09:00	0.000	1.000
	10:00-11:00	0.235	0.000		09:00-10:00	0.009	1.000
	11:00-12:00	0.307	0.000		10:00-11:00	0.023	1.000
	12:00-13:25	0.211	0.000		11:00-12:00	0.096	0.062
	15:20-18:00	2.484	0.000		15:20-18:00	2.273	0.000
	18:00-19:00	2.444	0.000		18:00-19:00	2.232	0.000
	19:00-20:00	2.488	0.000		19:00-20:00	2.277	0.000
	20:00-21:00	2.501	0.000		20:00-21:00	2.289	0.000
	21:00-22:00	2.477	0.000		21:00-22:00	2.265	0.000
	22:00-23:00	2.465	0.000		22:00-23:00	2.254	0.000
23:00-24:00	2.434	0.000	23:00-24:00	2.223	0.000		
09:00-10:00	03:00-04:00	-0.221	0.000	15:20-18:00	03:00-04:00	-2.484	0.000
	06:10-07:00	-0.002	1.000		06:10-07:00	-2.265	0.000
	07:00-07:54	-0.051	0.830		07:00-07:54	-2.314	0.000
	08:00-09:00	-0.009	1.000		08:00-09:00	-2.273	0.000
	10:00-11:00	0.014	1.000		09:00-10:00	-2.263	0.000
	11:00-12:00	0.087	0.131		10:00-11:00	-2.249	0.000
	12:00-13:25	-0.009	1.000		11:00-12:00	-2.177	0.000
	15:20-18:00	2.263	0.000		12:00-13:25	-2.273	0.000
	18:00-19:00	2.223	0.000		18:00-19:00	-0.040	0.966
	19:00-20:00	2.268	0.000		19:00-20:00	0.004	1.000
	20:00-21:00	2.280	0.000		20:00-21:00	0.017	1.000
	21:00-22:00	2.256	0.000		21:00-22:00	-0.007	1.000
	22:00-23:00	2.244	0.000		22:00-23:00	-0.019	1.000
23:00-24:00	2.213	0.000	23:00-24:00	-0.050	0.850		

Farklı saatlerde elde edilen koordinatlarda istatistiksel olarak anlamlı var

Tablo 14. Farklı GNSS değerlendirme servislerine göre elde edilen ikili karşılaştırmalar

GNSS yazılımları – Çoklu Karşılaştırmalar (Tamhane)							
Veri Saat Aralığı (I)	Veri Saat Aralığı (J)	X		Y		Z	
		Ortalama Fark (I-J)	Sig.	Ortalama Fark (I-J)	Sig.	Ortalama Fark (I-J)	Sig.
CSRS PPP	TRIMBLE RTX PPP	-0.002	1.000	-0.005	1.000	-0.012	0.999
	MAGIC GNSS	0.001	1.000	0.059	1.000	-0.003	1.000
TRIMBLE RTX PPP	CSRS PPP	0.002	1.000	0.005	1.000	0.012	0.999
	MAGIC GNSS	0.003	1.000	0.063	1.000	0.009	0.999
MAGIC GNSS	CSRS PPP	-0.001	1.000	-0.059	1.000	0.003	1.000
	TRIMBLE RTX PPP	-0.003	1.000	-0.063	1.000	-0.009	0.999

Tablo 15. Farklı GNSS değerlendirme servislerine göre oluşturulan alt gruplar

Yazılım	N	X		Y		Z	
		1	Sig.	1	Sig.	1	Sig.
MAGİCGNSS	15	-1.272	1.000	1.811	0.996	-0.073	0.989
CSRS-PPP	15	-1.270	1.000	1.870	0.996	-0.076	0.989
TRİMBLE RTX PPP	15	-1.268	1.000	1.874	0.996	-0.064	0.989
Sig.		1.000		0.996		0.989	

Tablo 16. Farklı veri saat aralığına göre oluşturulan alt gruplar.

Veri Saat Aralığı	X			Veri Saat Aralığı	Y		Veri Saat Aralığı	Z		
	1	2	3		1	2		1	2	3
20:00-21:00	-2.51			03:00-04:00	-0.03		21:00-22:00	-0.33		
19:00-20:00	-2.50			08:00-09:00	-0.01		23:00-24:00	-0.32		
17:20-18:00	-2.50			09:00-10:00	0.05		19:00-20:00	-0.31		
21:00-22:00	-2.49			12:00-13:25	0.05		22:00-23:00	-0.31		
22:00-23:00	-2.48			10:00-11:00	0.07		17:20-18:00	-0.30		
18:00-19:00	-2.46			06:10-07:00	0.08		20:00-21:00	-0.30		
23:00-24:00	-2.45			11:00-12:00	0.09		18:00-19:00	-0.30		
11:00-12:00		-0.32		07:00-08:00	0.12		03:00-04:00		0.00	
10:00-11:00		-0.25		23:00-24:00		3.79	11:00-12:00			0.13
09:00-10:00		-0.23		21:00-22:00		3.88	12:00-13:25			0.15
06:10-07:00		-0.23		20:00-21:00		3.91	08:00-09:00			0.15
12:00-13:25		-0.22		19:00-20:00		3.91	10:00-11:00			0.15
08:00-09:00		-0.22		22:00-23:00		3.92	09:00-10:00			0.15
07:00-08:00		-0.18		17:20-18:00		3.95	06:10-07:00			0.18
03:00-04:00			-0.01	18:00-19:00		3.99	07:00-08:00			0.20
Sig.	0.47	0.51	1.00	Sig.	0.80	0.42	Sig.	0.98	1.00	0.57

Tablolar incelendiğinde, farklı GNSS değerlendirme hizmetlerine dayalı olarak oluşturulan alt gruplarda, tüm koordinat eksenleri boyunca koordinatlar benzer özellik göstermektedir. Farklı veri saat aralığına göre oluşturulan alt gruplarda X ve Z koordinat eksenleri boyunca bulunan sonuçlar, ilk deprem öncesi, ilk ve ikinci depremler arası ve ikinci deprem sonrası olarak farklılık göstermektedir. Y koordinat eksenleri boyunca bulunan sonuçlar ise ikinci deprem öncesi ve ikinci deprem sonrası olarak birbirinden farklı özellik göstermektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışma, 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin Kahramanmaraş merkezli meydana gelen büyük depremlerinin yer kabuğu hareketleri üzerindeki etkilerini, internet tabanlı GNSS değerlendirme servisleri aracılığıyla detaylı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamıştır. Araştırmada, Deprem bölgesindeki TUSAGA-Aktif ağına bağlı 14 sabit istasyondan elde edilen veriler, CSRS-PPP, MagicGNSS ve Trimble RTX yazılımlarıyla analiz edilmiştir. Bunun yanı sıra, depremden en fazla etkilenen EKZ1 istasyonuna ait 06/02/2023 tarihindeki deprem günü verileri, farklı saat aralıklarında bu yazılımlar kullanılarak incelenmiştir. X, Y ve Z koordinatlarına yönelik yapılan analizlerde, hem parametrik (ANOVA) hem de nonparametrik (Kruskal-Wallis) yöntemler uygulanmış; bu yöntemler ile deprem öncesi, sırası ve sonrası dönemlerde meydana gelen konumsal değişiklikler istatistiksel olarak incelenmiştir.

Analiz sonuçları, özellikle Y koordinat eksenini boyunca belirgin yer değişimlerinin meydana geldiğini, Z koordinat eksenindeki değişimlerin ise görece sınırlı kaldığını göstermiştir. Saatlik bazda yapılan incelemeler EKZ1 istasyonunda deprem öncesi, iki deprem arası ve depremler sonrası dönemde meydana gelen konumsal değişikliklerin istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar içerdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, büyük depremlerin yer kabuğu hareketleri üzerindeki etkilerini anlık olarak izlemek ve değerlendirmek için GNSS değerlendirme servislerinin denli etkili olduğunu göstermektedir.

Çalışmada kullanılan internet tabanlı GNSS yazılımları arasında yapılan karşılaştırmalarda, sonuçların genel olarak uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, CSRS-

PPP'in diğer servislere göre daha stabil ve güvenilir sonuçlar sunduğu gözlemlenmiştir. Trimble RTX' ve MagicGNSS'in X ve Y koordinat eksenleri boyunca hareketlerin değerlendirilmesinde daha az kararlı sonuçlar ürettiği görülmüş, ancak Z koordinat eksenini ölçümlerinde tüm yazılımların benzer doğruluklar sunduğu ve bir tutarlılık sağladığı tespit edilmiştir.

Farklı veri saat aralıklarında yapılan analizler, iki büyük deprem öncesi ve sonrası dönemlerde konumsal farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle deprem öncesi, iki deprem arası ve ikinci deprem sonrası dönemlerde elde edilen koordinat değerleri, farklı özellikler sergilemiştir. Bu çalışma ile bulunan sonuçlar, GNSS değerlendirme servislerinin afet sonrası yer kabuğu hareketlerinin detaylı analizinde yüksek doğruluk sağladığını ve bu teknolojinin deprem gibi büyük ölçekli doğal afetlerin etkilerinin hızlı ve etkili bir şekilde izlenmesi için vazgeçilmez bir araç olduğunu göstermektedir. GNSS teknikleri, afet yönetimi, yeniden yapılandırma süreçleri ve bilimsel araştırmalar için kritik öneme sahiptir. Bu sonuçlar, deprem sonrası yer kabuğu hareketlerinin dinamik yapısını anlamada GNSS teknolojilerinin değerini açıkça ortaya koymaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and E. WasleD, GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more, Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, Understanding GPS: Principles and Application, Londra: Artech House, 2006.
- [3] Natural Resources Canada, CSRS-PPP Service, <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>, Accessed 23 March 2023.
- [4] GMV, MagicGNSS Software, <https://magicgnss.gmv.com/>, Accessed 13 March 2023.

- [5] Trimble Inc., Trimble RTX Technology, <https://positioningservices.trimble.com/> , Accessed 03 March 2023.
- [6] P. Misra and P. Enge, Global positioning system: signals, measurements & performance, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 17(10), 36-37, 2002.
- [7] D. Diouf, M. Ndiaye and L. Morel, Precise point positioning and differential solutions by online GNSS calculation tools and RTKLIB: a comparative study. International Journal of Geosciences, 14(2), 226-237 2023. <https://doi.org/10.4236/ijg.2023.142011>
- [8] M. F. Elrewiny, F. H. Zarzoura, and M. El-Mewafi. New Online Approach for Real-Time Precise Point Positioning GNSS Processing. Mansoura Engineering Journal, 49(3), 7, 2023.
- [9] A. El Shouny and Miky, Y. (2019). Accuracy assessment of relative and precise point positioning online GPS processing services. Journal of Applied Geodesy, 13(3), 215-227. <https://doi.org/10.1515/jag-2018-0046>
- [10] S. İnyurt ve M. Ulukavak, Web tabanlı GNSS Yazılımlarının (CSRS-PPP, Trimble-RTX) Performansının Araştırılması, Geomatik, 5(2), 120-126, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.586990>
- [11] S. Alçay ve H. İ. İmren, OPUS ve AUSPOS web-tabanlı GPS değerlendirme servislerinin farklı gözlem süreleri için doğruluk performanslarının incelenmesi, Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 6(2), 452-466, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.341282>
- [12] Ş. Ş. Yaşar ve E. E. Eyübagil, 23.11.2022 Gölyaka-Düzce Depreminde TUSAGA-Aktif İstasyonlarının Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 23, 712-721, 2023. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.12>
- [13] A. C. Uçarlı ve B. Bilgen, Otonom araçlarda çoklu GNSS uydusu sistemleri kullanımının konum doğruluğuna etkisinin araştırılması, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(1), 109-115, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1082124>
- [14] G. Başkan, Karakoçan ve Halepçe depremlerinin TUSAGA-Aktif istasyonlarına etkilerinin web tabanlı GNSS servisiyle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018. <https://acikerisim.selcuk.edu.tr/items/1705f5a4-b157-49df-8392-78b0de0db287>
- [15] S. Alçay ve Ö. F. Atiz, Farklı yazılımlar kullanılarak gerçek zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) yönteminin performansının incelenmesi, Geomatik, 8(1), 77-83, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>
- [16] S. Bülbül, C. İnal ve B. Bilgen, Mevsimsel değişimlerin hassas nokta konumlamaya etkisi, Konya Journal of Engineering Sciences, 10(2), 274-286, 2022. <https://doi.org/10.36306/konjes.1024445>
- [17] E. G. Özdemir, Bağlı ve mutlak (PPP) konum çözüm yaklaşımı sunan Web-Tabanlı çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin farklı gözlem periyotlarındaki performanslarının araştırılması, Geomatik Dergisi, 7(1), 41-51, 2022. <https://doi.org/10.29128/geomatik.809826>
- [18] S. Alçay ve C. Ö. Yiğit, CSRS-PPP, MagicGNSS and APPS Web Tabanlı Yazılımların Statik PPP Modüllerinin Karşılaştırılması, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5(1), 1-12, 2013.
- [19] R. M. Alkan, İ. M. Ozulu ve V. İlçi, Deniz Uygulamalarında Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin (PPP) Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma, Harita Dergisi, 154, 1-10, 2015.
- [20] R. M. Alkan, V. İlçi ve İ. M. Ozulu, PPP Yönteminde GPS ve GLONASS Uydularının Kullanımının Nokta Konum Doğruluğuna Etkisinin Araştırılması, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(2), 27-34, 2014.
- [21] K. Gümüş, C. T. Çelik ve M. G. Gümüş, A statistical investigation on the effects of different GNSS systems, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 432-442, 2023. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1198208>
- [22] A. Pırtı ve D. Yazıcı, İnternet tabanlı GNSS yazılımlarının doğruluk açısından değerlendirilmesi, Geomatik Dergisi, 7(2), 88-105, 2022. <https://doi.org/10.29128/geomatik.882843>
- [23] M. Şimşek, S. Özarpacı ve U. Doğan, Yer Kabuğu Hareketlerinin Belirlenmesinde Web Tabanlı Çevrimiçi GNSS Servislerinin Performans Analizi, Geomatik Dergisi, 4(2), 147-159, 2019. <https://doi.org/10.29128/geomatik.511758>
- [24] B. Konakoğlu ve A. Akar, Sivrice-Elazığ Depreminin TUSAGA-Aktif İstasyonlarının Konumlarına Olan Etkisinin Web Tabanlı GPS Yazılımları İle İrdelenmesi, Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13(2), 693-718, 2020. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.710158>
- [25] İ. Ç. Baş ve R. A. Abbak, 30 Ekim 2020 Ege Denizi depreminin kabuk deformasyonuna etkisinin TUSAGA-Aktif verileri ile incelenmesi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 14(2), 450-463, 2024. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1366028>
- [26] E. E. Eyübagil, Ş. Ş. Yaşar, E. B. Çakanşimşek, H. Duman, H. İ. Solak, A. Özkan, C. Gezgin, H. H. Yavaşoğlu, İ. Tiryakioğlu, F. Poyraz, B. Aktuğ, C. Ö. Yiğit, Ç. Özkaymak ve H. Özener, 6 Şubat 2023 Sofalaca-Şehitkamil Gaziantep (Mw:7.7) ve Ekinözü Kahramanmaraş (Mw:7.6) Depremlerinin GNSS Gözlemlerine Bağlı Öncül Sonuçları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 160-176, 2023. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1251601>
- [27] D. Ö. Demir, Trimble RTX servisi kullanılarak uydusu kombinasyonlarının hız kestirimine etkisinin incelenmesi, Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 11(1), 68-79, 2024. <https://doi.org/10.9733/JGG.2024R0006.T>
- [28] D. Ö. Demir ve Ö. Güneş, 29 Temmuz 2021 Mw= 8.2 Chignik, Alaska Peninsula depremi

- deformasyonlarının bağıl konum belirleme servis sonuçları ile incelenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(2), 575-581, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1387411>
- [29] United States Geological Survey (USGS), Magnitude 2.5+ Earthquakes, Past Day, , <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>, Accessed 10 November 2023.
- [30] Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı - Aktif, Tusaga Aktif, <https://www.tusaga-aktif.gov.tr> , Accessed 20 January 2024.
- [31] EUREF Permanent GNSS Network, Royal Observatory Of Belgium, https://www.epncb.oma.be/_productservices/coord_trans/ , Accessed 13 February 2024.
- [32] B. G. Tabachnick, L. S. Fidell and J. B. Ullman, Using multivariate statistics, Boston, MA: Pearson, 2013.
- [33] A. Field, Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics (4. baskı), Sage Publications, 2013.
- [34] D. J. Sheskin, Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures (4. baskı), Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420036268>
- [35] W. J. Conover, Practical Nonparametric Statistics (3. baskı), New York: John Wiley & Sons, 1999.



**Deep learning classification and object detection in helicopter images:
Performance analysis of GoogleNet, AlexNet and YOLOv9c architectures****Helikopter görüntülerinde derin öğrenme ile sınıflandırma ve nesne tespiti:
GoogleNet, AlexNet ve YOLOv9c mimarilerinin performans analizi****İrem Hatice Doğan¹ , Ozan Arslan² , Ayşe Betül Tat³ , Burhan Şahin⁴ , Ege Erberk Uslu^{5,*} ,
İbrahim Yülüce⁶ , Orhan Dağdeviren⁷ **^{1,2,3} İnönü University, Computer Engineering Department, 44280, Malatya, Türkiye⁴Turkish Aerospace, 06980, Ankara, Türkiye^{5,6,7}Ege University, Computer Engineering Department, 35100, İzmir, Türkiye**Abstract**

Helicopter imaging classification and detection are crucial for autonomous navigation, military operations, search and rescue, and civil aviation management. This study utilized two helicopter image datasets, applying data augmentation techniques such as random resizing, cutting, horizontal rotation, rotation, and color adjustments, along with histogram equalization for contrast enhancement. Twenty-four helicopter classes were trained using GoogleNet and AlexNet architectures, while the YOLOv9c model was employed for object detection. The results revealed that the GoogleNet classification model achieved an 81% F1 score, and AlexNet reached 73%. In contrast, the YOLOv9c model demonstrated an average mean Average Precision (mAP) of 87%. These findings indicate that CNN architectures and YOLO are effective for helicopter image classification and detection, highlighting their potential applications in military, search and rescue, and civil aviation contexts.

Keywords: Helicopter Image classification, Object detection, Convolutional neural networks, Data augmentation**1 Introduction**

Rescue missions, autonomous navigation systems, civil aviation management, aircraft identification, and classification and detection of helicopter images are crucial. Flying activities, particularly military, rescue, and surveillance missions, are greatly enhanced by implementing robust classification systems, which also increase safety. Helicopters bring some challenges for image classification due to their different designs, structural differences, and various operational environments and conditions. Varying

Öz

Helikopter görüntülerinin sınıflandırılması ve tespiti, otonom navigasyon sistemlerinin, askeri operasyonların, arama kurtarma görevlerinin ve sivil havacılık yönetiminin önemli bileşenlerindedir. Bu çalışmada helikopter görüntüleri için iki farklı veri seti kullanılmıştır. Sınıflandırma için rastgele yeniden boyutlandırma, kesme, yatay döndürme, döndürme ve renk değişiklikleri gibi veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Görüntülerin kontrastı da histogram eşitleme yöntemi kullanılarak yeniden düzenlenmiştir. 24 sınıf helikopter veri seti GoogleNet ve AlexNet mimarileri kullanılarak eğitilmiştir. Nesne tespiti için YOLOv9c mimarisi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, GoogleNet tabanlı sınıflandırma modelinin test setinde %81 F-1 skoru elde ettiğini ve AlexNet modelinde genel F1 skorunun %73 olduğunu göstermektedir. YOLOv9c modeli ise ortalama %87 mAP oranları elde etmiştir. Bu sonuçlar, bir tür derin öğrenme modeli olan CNN mimarilerinin ve YOLO nesne tespitinin helikopter görüntüsü sınıflandırma ve tespitinde iyi olduğunu gösteriyor. Çalışma, helikopter ve bileşenlerini tespit etme ve sınıflandırmada iyi performans gösteren modellerin askeri, arama kurtarma ve sivil havacılık dahil üzere çeşitli alanlarda kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Helikopter Görüntü sınıflandırma, Nesne algılama, Evrişimli sinir ağları, Veri artırma

observation angles and other lighting conditions and background clutter increase these challenges. Advanced image classification algorithms have try to solve these challenges.

Significant advances in image classification [1,2] and prediction [3,4] have occurred in recent years. Developing Convolutional Neural Networks (CNNs) and refining transfer learning techniques are leading these advances. CNNs is a suitable architecture for image classification. This is because it automatically learns hierarchical features from

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail ege.erberk.uslu@ege.edu.tr (E.E. Uslu)

Geliş / Recieved: 29.09.2024 Kabul / Accepted: 26.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1556995

raw pixel data. Due to this feature, CNNs are highly ideal for the helicopter classification task.

Finding and recognizing helicopters during military operations relies heavily on object detection. The You Only Look Once (YOLO) architecture has taken the lead in object recognition due to its accuracy and speed [5]. Thanks to its integrated design, which computes bounding boxes and class probabilities from full images in a single evaluation, it is well-suited for helicopter and structure recognition. By integrating YOLO object detection with CNN classification, we can detect helicopter components and identify different types of helicopters. This research provides a deep-learning strategy for component recognition and classification in helicopter images.

We created two separate datasets for object recognition and classification using images of helicopters. To minimize the chance of overfitting, we used several data augmentation methods to the dataset of helicopter images we created for the classification assignment. These augmentations include rotation, color changes, random resizing cropping, and horizontal flipping. These operations enlarge the training dataset and enhance the model's capacity for generalization. The enlarged dataset is split 70-20-10% into training, validation, and test sets, respectively, to thoroughly assess the model's functionality. In addition, we tailored a smaller dataset to the object detection job. We did not use data augmentation for this work.

The foundation of the classification model is GoogleNet [6], which has emerged as a frontrunner due to its efficiency and excellent performance in picture recognition tasks. The pre-trained GoogleNet model was fine-tuned and trained on the 24-class helicopter dataset we developed using transfer learning. In addition, the YOLO architecture was used for the object detection task by fine-tuning on the other developed dataset.

As an classifier, GoogleNet was our top pick. Everything from batch size and epoch number to learning rate and patience time to early stopping is detailed. Step, weight decay, and learning rate were tweaked with the help of the LR planner. In order to train the model, we used weight decay in conjunction with the Adam optimization technique. The 24-class classification matrix, which includes metrics for recall, accuracy, and F1-score for each helicopter class, is employed to evaluate the classification model's efficacy. The classification results obtained serve as evidence of the model's ability to distinguish between helicopter models. The model's 81% overall accuracy on the test set is a dependable indicator of its performance, as demonstrated by mathematical analysis.

The second model that was implemented was AlexNet [7]. Researchers and programmers have implemented them extensively since their introduction in 2012. This eight-layer model served as the initial illustration of the capacity of deep neural networks to identify images. Subsequent iterations have been significantly influenced by its architectural principles, which have since become industry standards. Many of the methods used in this approach, such data augmentation and dropout, are now standard procedures in neural network training. There are 21,680,216 parameters in

total for AlexNet based on our data. Adam optimizer is used as Alexnet's optimizer. Also Adam was selected since it accounts for both momentum and Root Mean Square Propagation (RMSprop) . The learning rate variable was chosen as 0.0001. Although choosing a lower value slightly improves the performance, it significantly increases the running time, so this ratio is ideally preferred. Like the previous algorithm, the model runs on a 24-class dataset. Both models have a runtime of 50 epochs.

For object recognition, the YOLOv9c [8] model was used. The model was not altered in any way. Successful findings were achieved when YOLOv9c's fine-tuning performance was assessed on a test set of helicopter images. The fine-tuned model demonstrated adequate accuracy in identifying different aircraft parts. For each class, mean accuracy (mAP), recall, and overall accuracy scores were noted, and assessments were based on these data. Specifically, the model scored 96.60% accuracy, 97.70% recall, and 98.30% mAP for the "helicopter" class, which refers to the location detection of the helicopter. The model also demonstrated robust performance metrics for the landing bar, cockpit, tail, and propeller, among other components. The model's exceptional resilience in these numerous component identification tasks distinguishes it.

The proposed research represents the whole methodology that considerably enhances the helicopter image classification. In particular, we make use of a convolution neural network referred to as CNN, which has gained wide reputation for image processing. Using transfer learning, we can plug into those models that have already learned essential features from huge sets of data and raise the accuracy and efficiency of our work in classification. We have also tried different methods in order to enhance our dataset. Data augmentation is a used for creating modified versions of already existing images by means of rotation, scaling, and flipping. This increases diversity within the training data, hence helping to avoid overfitting and improving the capability of the model for better generalization on test images. Also, our research does not stop at mere categorization. We furthered the key job of object detection using the YOLOv9c model with the help of our dataset. YOLO is utilized for object detection in real time. This can detect lots of items in one image very fast and precisely. By fine-tuning the YOLOv9c model on our dataset, this makes the model much more cognizant and observant of those objects important in the research.

Following the introduction, the paper is organized as follows: Section 2 reviews previous work on the topic. Section 3 provides a detailed account of the data collection process, including the sources of the data, the criteria for data selection, and any preprocessing steps. Section 4 describes the methodologies used. Section 5 presents the model architectures used in the study and Section 6 describes the data training process. Section 7 contains the model evaluation results. Finally, Section 8 summarizes the conclusions of the study and discusses potential future research directions

2 Related works

The first paper we are going to review is a paper written in 2020. This paper introduces remote sensing imagery in relation to a machine recognition application for aircraft type recognition, a new benchmark dataset called MTARSI. The dataset contains more than 9,000 images of 20 aircraft types with various characteristics such as complex backgrounds with different spatial resolutions, various poses, positions, illuminations and time periods. The authors argue that existing datasets used for aircraft detection are not suitable for remote sensing imagery and that previous studies have been applied with different datasets and settings, making it difficult to make comparisons. MTARSI aims to provide researchers with a standardized benchmark for developing and evaluating aircraft type recognition algorithms. They try to classify images with 10 different algorithms. As a result of this classification, the best algorithm for their dataset was EfficientNet with a success score of 89.79%. Other well-known and frequently used algorithms Resnet and GoogleNet achieved 89.61% and 86.53% respectively [9].

In the second paper, authors proposed a novel aircraft recognition scheme that utilizes a modular extreme learning machine (ELM) classifier. The scheme extracts three types of moment invariants (Hu, Zernike and Wavelet) as features from aircraft images and uses them as input to three separate modular neural networks. Each modular network consists of multiple single hidden layer feed-forward networks trained on different clustered data subsets using ELM. The final classification output is obtained by combining the outputs of each modular network according to their weighted sum. The scheme is evaluated on six different aircraft models and achieves a higher recognition accuracy compared to single ELM classifiers and other classification algorithms [10].

In this work, they developed SFSA (Scatter Features Spatial-Structural Association Network), a new deep learning model for aircraft recognition in SAR (synthetic aperture radar) images. It combines information from electromagnetic scattering features and image space features to improve recognition accuracy. It extracts strong scattering points (SSPs) from aircraft images and models their spatial relationships as a graph. A Graph Convolution Network (GCN) is used to extract structural features from this graph, and a modified Visual Geometry Group Network (VGGNet) is applied to retrieve image space features. Finally, it combines these two types of features to provide better recognition performance. The effectiveness of the proposed method has been validated on a SAR aircraft dataset [11].

Wang Y. et al. propose a hybrid attention network model (BA-CNN) for aircraft image recognition. This model utilizes a two-channel ResNet34 architecture for feature extraction and enhances its ability to capture fine details in aircraft images. The model integrates a hybrid attention mechanism combining channel and spatial attention modules. This mechanism enables the model to focus on important features in both channel and spatial dimensions, strengthening its discrimination capability. The BA-CNN model is trained and tested on the Fine-Grained Visual Classification of Aircraft (FGVC-Aircraft) dataset for fine-grained image classification. The results show that the BA-

CNN model achieves 89.2% recognition accuracy, outperforming other state-of-the-art methods. The hybrid attention mechanism proved effective in improving the model's discriminative feature learning and recognition accuracy [12].

Using CNNs and a generalized Multiple Instance Learning (MIL) framework, a novel approach for detailed aircraft detection in remote sensing images is proposed in another recent study. The main difficulty with comprehensive identification is that it is sometimes necessary to provide thorough component descriptions in order to detect minute variations within subcategories. With this approach, an airplane is seen as a bag of samples (head, tail, and wing, for example), and the goal is to create a model that can identify different kinds of aircraft only by looking at these components. Explicit part descriptions are not necessary. A pre-trained CNN serves as the feature extractor in this technique, along with components for instance transformation and MIL pooling. The CNN's patch-level features are transformed into instance-level features via the instance transformation component, which improves the model's capacity to identify distinguishing elements. By averaging the sample-level scores, the MIL pooling component makes a prediction on the kind of aircraft. In comparison to conventional CNN-based techniques and conventional MIL networks, experiments conducted on a combined aircraft dataset demonstrate that our method increases accuracy and lowers computing costs. The aircraft's unique areas are efficiently targeted by the generalized MIL framework, which suppresses background noise and captures diverse properties of different subcategories [13].

For various tasks involving object recognition and categorization, the works provided in [14-17] may be examined.

3 Data collection

As a first step in the data collection procedure, we sought reliable sources. In this context, leading websites were preferred and helicopter data were collected and processed using a range of technological tools and, importantly, scientific techniques. The Selenium library was used to collect and automate the information on these websites. To handle the dynamic structures of the websites and to analyze complex website architectures, we developed and used customized algorithms in the study. These algorithms revealed the visual data of the helicopters. We applied extensive error checking procedures and validation techniques to ensure the consistency and integrity of the visual data. Visual data that did not meet the quality requirements were not included in the dataset. As a result of these procedures, we obtained comprehensive and accurate information about the helicopters. The visual data of the helicopter components were labeled using the Roboflow platform and the helicopter class data were labeled using file hierarchy logic. All of our data was prepared in accordance with our algorithms, and we aimed to make it possible to achieve high performance.

4 Methodology

For helicopter classification, AlexNet and GoogleNet models were preferred. AlexNet provides fast training and inference thanks to its simple and efficient architecture and builds a solid foundation with its basic feature extraction capabilities. GoogleNet, on the other hand, offers more advanced feature extraction and high classification accuracy thanks to its deep architecture and inception modules. The simplicity and depth offered by AlexNet and GoogleNet provide the required performance in classifying helicopter images. In this study, two separate datasets were used for these two different tasks. While the YOLOv9c model is used for object detection, the GoogleNet and AlexNet models are used for classification. In order to compare the performance of the models, detailed comparisons were made.

4.1 Datasets

In this study, two datasets were prepared. The first dataset was created for the YOLO model, while the other dataset was created for the models we will use.

4.1.1 YOLOv9c dataset

The dataset used with the YOLOv9c model consists of various images of helicopter components and is divided into five different classes: helicopter, landing bar, cockpit, tail and propeller. There are 29 images for each class, totaling 145 image samples. The images were resized to 640x640 pixels to fit the input size of the model. This was done to ensure that the model can perform consistent feature extraction in each image.

4.1.2 Model dataset

The dataset used for our models consists of a larger image archive. The dataset includes 24 different helicopter models and consists of 2494 images in total. The dataset is divided into three parts: 70% for training, 20% for validation and 10% for testing. Out of 2494 image data, 1745 images were used in the training set, 498 in the validation set and 251 in the test set. The analysis of the dataset used for the models was analyzed as class distribution, image size distribution and image proportion distribution.

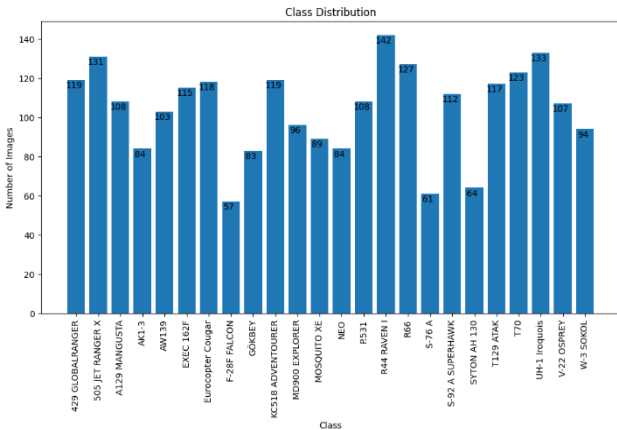


Figure 1. Helicopter class distribution

Figure 1 shows the number of images for each helicopter class. The number of images belonging to each class in the dataset is quite close to each other. A balanced distribution among the classes in the dataset increases the capacity of the model to learn each class. However, some classes have a higher number of images than others, as seen in R44-RAVEN-1 and UH-1 Iroquois. This may cause the model to learn these classes better. In addition, the number of images of the F-28F FALCON helicopter is quite low compared to the other types, but the model's performance may decrease in classes with a small number of images. This imbalance can be overcome by using data augmentation techniques for classes with few images.

Figure 2 shows the width and height distribution of the images in the dataset. There is a wide range of image sizes. However, most of them are concentrated around 500 pixels. This indicates that the images need to be resized to standard sizes. This will make them suitable for the input size of the GoogleNet model to be used.

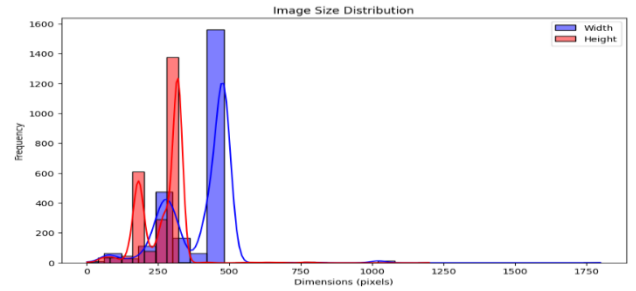


Figure 2. Image sizes distribution

The 2,494 valid images in the dataset, which cover a wide range of dimensions, are summarized in Table 1 and Figure 3. The average picture width of around 399.06 pixels and height of 268.06 pixels show that most images have a rather low resolution. Yet, the dataset does exhibit notable variety, suggesting the presence of a range of image sizes, with standard deviations of 122.46 pixels for width and 79.20 pixels for height. High-resolution samples have the largest size, 1800x1200 pixels, whereas defective or improperly processed images have the lowest dimensions, 1x1 pixels. The interquartile range, which includes widths of 299–480 pixels and heights of 189–320 pixels, reflects the size of most of the dataset. To ensure consistency and applicability for machine learning applications, these data highlight the need of preprocessing steps like scaling.

Table 1. Image Dimensions Summary

Feature	Width	Height
Count	2494.00	2494.00
Mean	399.06	268.06
Std	122.46	79.20
Min	1.00	1.00
25%	299.00	189.00
50%	464.00	310.00
75%	480.00	320.00
Max	1800.00	1200.00

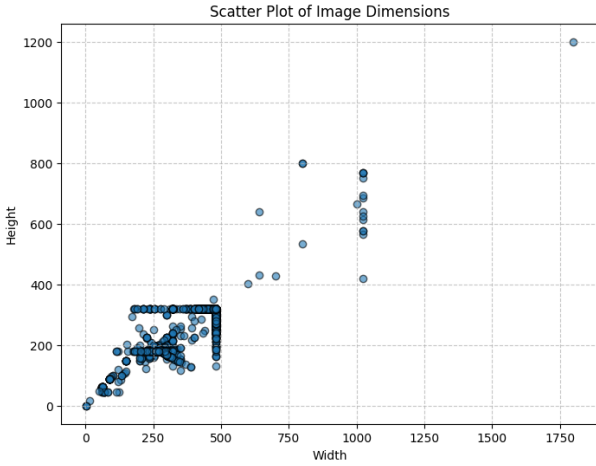


Figure 3. Image dimension analysis

Histogram equalization was applied to this dataset to address significant variations in brightness and contrast, as illustrated in Table 2. The dataset shows an average brightness of 144.13 and a contrast of 57.68, reflecting moderate levels overall. The wide range of values—from complete darkness (minimum brightness of 0) and flat images (minimum contrast of 0) to fully saturated (maximum brightness of 255) and highly dynamic images (maximum contrast of 106.76)—highlights inconsistencies that could negatively affect subsequent tasks like classification or object detection. The extremes in brightness and contrast indicate that certain images may demonstrate poor visibility or insufficient intensity variation to distinguish features effectively. The analysis helps us to better discover the characteristics of the our dataset and optimize training process of the model.

Table 2. Brightness and Contrast Summary

Feature	Brightness	Contrast
Count	2494.00	2494.00
Mean	144.13	57.68
Std	30.63	12.99
Min	0.00	0.00
25%	121.32	49.00
50%	138.78	58.32
75%	157.14	66.63
Max	25.00	106.76

A considerable degree of imbalance in the dataset is indicated by the class balance ratio of 0.2071. While the standard deviation shows notable differences in class frequencies, the mean class count shows a balanced distribution of pictures across classes. This disparity might lead to biased model training, where the model performs poorly in underrepresented classes and well in overrepresented ones. To solve this problem, preprocessing methods such as data augmentation for classes are used. This improves the model's resilience and prediction performance in real-world applications by strengthening class representation and guaranteeing that it generalizes well across all classes.

All images have been resized to 224x224 pixels so that the model can process each image consistently. An example image of our dataset is given in Figure 4.



Figure 4. Sample dataset images

These images are of the 429 Globalranger model. The sample images are shown from our random dataset, and the colors of the helicopters, their positions, and the direction of shooting the images are different from each other. This provides real scenario examples for both models. Our goal is to perform the classification process correctly regardless of the image.

4.2 Data augmentation

A detailed data enrichment approach was put in place to improve the generalizability of the model and to stop it from overfitting. This methodology is aimed at inducing variability and resilience in the training dataset by applying transformations that are split into a sequence of very carefully defined steps. Random Resized Cropping was used to standardize images to a 224×224 -pixel resolution while simultaneously maintaining the spatial diversity present in the dataset. This provided the model with the capability to identify features regardless of their positional or scalar changes. To enhance invariance to horizontal orientations, Random Horizontal Flipping was applied with 50% probability. Such a transformation helped to include mirrored patterns, therefore strengthening the model. Random Rotation was used to increase rotational invariance with random angular rotations of the images up to 75° (including 15, 30, 45, and 60) to ensure that the model could adequately detect and classify objects regardless of their rotational positioning. To simulate different lighting and color conditions, Color Jittering was introduced, where parameters like brightness, contrast, saturation, and hue were systematically changed. Contrast and saturation were adjusted from 0.1 to 0.3, while brightness was adjusted from 0.2 to 0.6. The hue was changed from 0.1 to 0.6. By doing so, it resulted in a realistic range of color and light conditions that increased the effectiveness of the model in different scenarios. To make sure that the input distribution stayed the same after these changes, the dataset was made homogeneous with a mean of [0.485, 0.456, 0.406] and a standard deviation of [0.229, 0.224, 0.225]. These augmentation techniques resulted in an expansion of the original dataset to 19,944 images, which were then separated into 251 test samples, 498 validation samples, and 19,195 training samples. This augmentation strategy helped the model greatly, since it reduced overfitting and made the model more resilient against variability in the data, in order to be more applicable in a variety of real-world scenarios.

4.3 Histogram equalization

In order to increase the contrast of the images of the models' dataset and to obtain clearer images, a histogram equalization (HE) technique was used. As shown in Figure 5, the histogram equalization process improved the contrast of the images by balancing their pixel intensity distributions, both overall and by color channel.

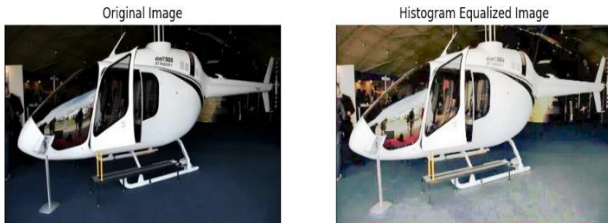


Figure 5. Original Image and After HE

This will enable the model to extract more and more accurate information from the images, which will positively affect its overall performance. The more balanced and high contrast images obtained after the histogram equalization process will be used more effectively in the learning process of the model. This will improve classification accuracy and overall model performance.

5 Model architectures

The YOLOv9c model is a deep learning model that was designed with object detection in mind. The YOLOv9c [8] model architecture is an upgraded new series of the YOLO series that addresses critical issues in deep learning methods, such as the information bottleneck and the accumulation of errors in deep networks, by incorporating the Programmable Gradient Information (PGI) framework. YOLOv9c is built using the fundamental elements from YOLOv7. Especially concerning architecture and efficiency, the YOLOv9c model shows notable improvements over previous models. These improvements allow the model to run more complex object detection tasks now. They have improved architectural simplicity and computer performance. Such optimizations are crucial for deploying deep learning models in real-world applications where computational resources are often limited, and are essential for helicopter detection and classification, a real-world application. In the training process of the model, pre-trained YOLOv9c weights were used. This allowed for a faster and more efficient training process, taking advantage of the fact that the model had been previously trained on a large dataset. The final layers of the model were adapted to fit the number of classes of our dataset.

In this study, GoogleNet architecture is used to classify helicopter types. The GoogleNet architecture is a deep convolutional neural network with an extensive layer structure and additional classification layers [6]. The main components of the model are as follows: The GoogleNet model, pre-trained on ImageNet, is highly effective in learning basic image features and is used as the main body. The fully connected layers are customized for classification and the fully connected layers in the original GoogleNet

model are reconstructed to fit the number of classes. To avoid overlearning, 40% dropout was applied and the last fully connected classification layer was adjusted to set the output size of the model to the number of classes in the dataset, i.e. 24. In addition, two auxiliary classifiers from the original structure of the GoogleNet model were used to allow the main model to generalize better and gradients to reach deeper layers. These auxiliary classifiers are similarly constructed with dropout and fully connected layers. This structure allows the model to both perform better on training data and increase its generalization capability.

AlexNet [8] architecture is used as the second model. AlexNet architecture has an important place among deep convolutional neural networks and has shown high success in large-scale image recognition tasks. The main components of the model are as follows: Starting with a convolution layer with 11x11 filters, the network learns more complex features in deep layers by performing extensive feature extraction.

The model architecture is structured as follows: The first layer applies an 11x11 convolution with 96 filters, followed by batch normalization and then a 3x3 max pooling operation. The second layer conducts a 5x5 convolution using 256 filters, similarly followed by batch normalization and another max pooling step. Subsequent layers, namely the third, fourth, and fifth, implement 3x3 convolutions with 384, 384, and 256 filters respectively. These layers are designed to progressively capture more complex features within the data. The architecture then transitions to fully connected layers, consisting of two layers, each with 4096 neurons. To prevent overfitting, each of these layers incorporates a 50% dropout regularization. The final layer employs a softmax activation function to classify across 24 categories, providing a probability distribution over these classes. This configuration has been carefully tuned through extensive experimentation to optimize performance on training datasets while enhancing the model's ability to generalize to new data. All parameters described have been selected to achieve superior results based on rigorous empirical testing.

6 Data training process

Experimental studies for classification include the learning rate, batch size, epoch size, early stop and patience hyperparameters. In the study, transfer learning models were used and the model was fine-tuned. The hyperparameters and values of the most efficient classification model in these experiments were determined as learning rate 0.001, epoch size 32, epoch number 50 and patience time 5. The learning rate was adjusted by using a decay factor of 0.1 every 5 epochs and StepLR scheduler. The study employed a model trained with a weight decay of 1×10^{-4} and the Adam optimization algorithm. The model's performance was assessed through a 24-class classification setup, measuring accuracy, recall, and F1-score for each helicopter category. For object detection, the YOLOv9c model was utilized without any alterations. This model underwent training for 100 epochs, while the Googlenet model was trained for 50 epochs. The validation dataset played a crucial role in

evaluating the model's performance throughout the training phase and in the learning process.

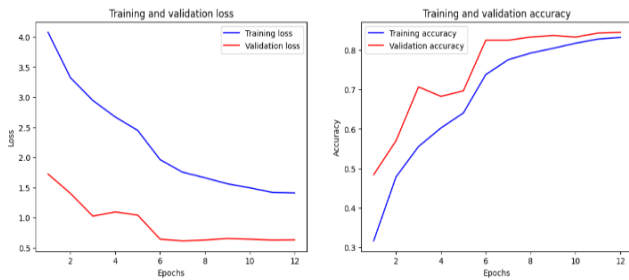


Figure 6. Training, validation loss and accuracy graphs

Figure 6 shows the training and validation loss curves of the GoogleNet model. The curve decreases consistently over the epochs, showing that the model is learning efficiently. The training loss curve consistently decreased as the epochs progressed. This shows that the model is learning the training data well. The validation loss curve similarly decreases, indicating that the model performs well on the overall data and there is no overlearning. The training accuracy of the GoogleNet model has been continuously increasing, showing that the model's performance on the training data has improved and was measured at 83%. The validation accuracy increased in a similar way, showing the generalization ability of the model. The value was observed to be 85%. The value and the pattern of increase here reveals that the model also performs well on test data, i.e. data that the model has not seen before.

Figure 7 shows the change in accuracy and loss values for AlexNet during the training process of the model. At the beginning of training, the accuracy value starts at around 20%. As the number of epochs increases, the accuracy value gradually increases. Especially during the first 20 epochs, a significant increase in accuracy is observed. This increase indicates that the model starts to adapt to the data. When the number of epochs reaches 40, the accuracy exceeds 80% and stabilizes in the last epochs. This shows that the performance of the model is continuously improving throughout the training process and it classifies the data better. The loss value is quite high at the beginning of the training and decreases rapidly in the first epochs. This rapid decrease indicates that the model's errors are rapidly decreasing at the beginning and the parameters of the model are optimized.

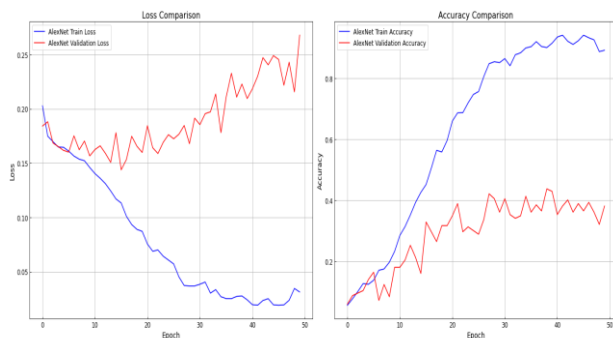


Figure 7. Validation loss and accuracy graphs

When the number of epochs approached 20, the loss value decreased significantly to around 0.05. When the number of epochs reached 40, the loss value dropped below 0.025 and remained at this level for the last epochs. This decrease in the loss value indicates that the learning process of the model is progressing successfully and that it adapts well to the training data. Based on this graph, it can be concluded that the AlexNet model has successfully carried out the training process and has been able to cope with the classification task given to it on the dataset and the overall performance of the model is high.

7 Model evaluation results

For each class, the performance of the YOLOv9C model was measured using criteria such as precision, recall and mAP (Mean Average Precision). The overall precision for this model was 85.2%. The classification results with GoogleNet were evaluated with precision, sensitivity and F-1 score metrics and the overall F-1 score was 81%. The results obtained by both models on a class basis are detailed below.

7.1 YOLOv9c results

The YOLOv9c model's general accuracy came out to be 85.2%. This result indicates that the model performs satisfactorily for the object detection challenge. The helicopter class performed the best, with 96.6% accuracy, 97.7% recall, and 98.3% mAP50. However, with 74.1% accuracy and 59.3% recall, the Propeller class had less performance than the other classes. Table 3 presents all the data findings.

Table 3. YOLOv9c results

Class	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95
Helicopter	0.966	0.977	0.983	0.62
Landing Bar/Gear	0.827	0.828	0.843	0.34
Cockpit	0.897	0.931	0.930	0.397
Tail	0.826	0.862	0.865	0.338
Propeller	0.741	0.593	0.724	0.303
Overall	0.852	0.838	0.869	0.400

Figure 8 displays, with confidence value given, the many helicopter components found using the YOLOv9c model.

Although the cockpit and propeller are identified with confidence levels of 75% and 65%, respectively, the general form of the aircraft has a confidence level of 85%, with a confidence level of 76% for the tail and 83% for the landing gear, respectively. These many confidence levels correspond to the degree of precision of the method in identifying and grouping every component.

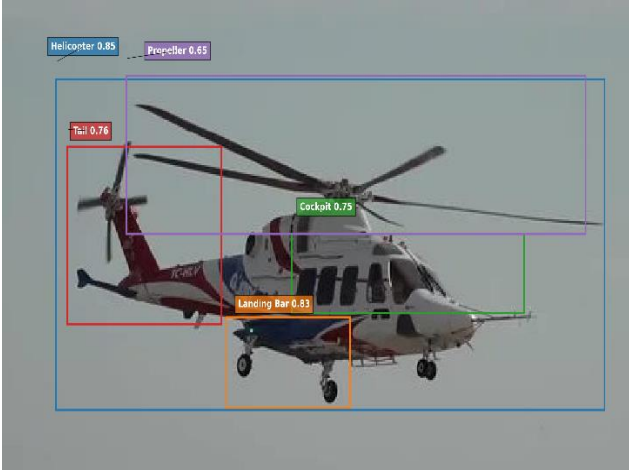


Figure 8. Training, validation loss and accuracy graphs

7.2 GoogleNet results

The performance metrics of the GoogleNet model in Table 4 show that it achieved high accuracy in the classification task. The overall accuracy of the model is 81%, with precision and recall values generally at high levels. In particular, 100% precision and recall values were achieved for the A129 Mangusta, AW139 and MD900 Explorer classes. However, lower precision and recall values were observed in the KC518 Adventurer and 505 Jet Ranger X classes. This may be due to the fact that these classes have less distinctive features than the other classes or that they have less data in the dataset.

7.3 AlexNet results

The model shows an overall high accuracy, as evidenced by the strong concentration of values along the diagonal. This indicates a good ability to correctly classify most helicopter types. However, certain classes pose challenges for the model. For the 505 Jet Ranger X helicopter model, the number of correctly labeled images is 5, while the number of incorrectly labeled images is shown to be 23. This has a negative impact on the success of the model. These deviations are possible due to the quality of the images of the models, the shooting direction or the similarities between the models.

In Table 5, the performance metrics of the AlexNet model show that, like GoogleNet, it provides high accuracy in the classification task. The overall accuracy of the model is 75%, with precision and recall values generally at high levels. The highest accuracy value was observed for the Eurocopter Cougar helicopter. The lowest accuracy was observed for the R44 Raven I. While there were high achievements in some classes, there were some classes where the achievements dropped by half compared to the other classes.

The performance of the YOLOv9c, GoogleNet and AlexNet models in the detection and classification of helicopters and helicopter components is presented in detail. The overall accuracy of the YOLOv9c model is 85.2%, which shows that the model is effective in the object detection task. The overall accuracy of the GoogleNet model

is 81% and 75% for the AlexNet model. Overall, our models performed reliably in the classification task.

Table 4. GoogleNet results

Class	Precision	Recall	F1-Score
429 GLOBALRANGER	0.67	0.53	0.59
505 JET RANGER X	0.53	0.50	0.52
A129 MANGUSTA	1.00	0.92	0.96
AK1-3	1.00	0.88	0.93
AW139	1.00	1.00	1.00
EXEC 162F	0.53	0.67	0.59
Eurocopter Cougar	0.86	1.00	0.92
F-28F FALCON	1.00	1.00	1.00
GÖKBEY	1.00	1.00	1.00
KC518	0.42	0.45	0.43
ADVENTOURER			
MD900 EXPLORER	1.00	1.00	1.00
MOSQUITO XE	0.90	0.90	0.90
NEO	1.00	0.40	0.57
P.531	1.00	1.00	1.00
R44 RAVEN I	0.67	1.00	0.80
R66	0.69	0.65	0.67
S-76 A	0.50	0.50	0.50
S-92 A SUPERHAWK	1.00	0.86	0.92
SYTON AH 130	0.70	0.88	0.78
T129 ATAK	0.92	1.00	0.96
T70	1.00	0.82	0.90
UH-1 Iroquois	0.91	1.00	0.95
V-22 OSPREY	0.92	1.00	0.96
W-3 SOKOL	0.91	0.91	0.91
Overall	0.81	0.81	0.81

Table 5. AlexNet results

Class	Precision	Recall	F1-Score
429 GLOBALRANGER	0.74	0.67	0.70
505 JET RANGER X	0.60	0.58	0.59
A129 MANGUSTA	0.71	0.79	0.75
AK1-3	0.59	0.87	0.70
AW139	0.76	0.73	0.75
EXEC 162F	0.75	0.54	0.63
Eurocopter Cougar	0.96	0.87	0.91
F-28F FALCON	0.78	0.58	0.67
GÖKBEY	0.92	0.75	0.83
KC518	0.50	0.69	0.58
ADVENTOURER			
MD900 EXPLORER	0.73	0.80	0.76
MOSQUITO XE	0.77	0.56	0.65
NEO	0.81	0.72	0.76
P.531	0.80	0.67	0.73
R44 RAVEN I	0.51	0.87	0.65
R66	0.66	0.82	0.73
S-76 A	0.89	0.67	0.76
S-92 A SUPERHAWK	0.81	0.85	0.83
SYTON AH 130	0.88	0.74	0.80
T129 ATAK	0.86	0.77	0.81
T70	0.72	0.78	0.75
UH-1 Iroquois	0.76	0.86	0.81
V-22 OSPREY	0.69	0.65	0.67
W-3 SOKOL	0.82	0.56	0.67
Overall	0.75	0.72	0.73

Table 6. Model comparison results

Class	Precision	Recall	F1-Score
GoogleNet	0.81	0.81	0.81
AlexNet	0.7510	0.7309	0.7323

Table 6 compares the helicopter identification performance of two deep learning architectures, GoogleNet and AlexNet. The results show that GoogleNet achieves a precision score of 0.81, a recall of 0.81 and an F1 score of 0.81, while AlexNet achieves a precision score of 0.7510, a recall of 0.7309 and an F1 score of 0.7323. The high F1 scores and similar recall values for both models suggest that both are effective at detecting true positives. However, GoogleNet's higher sensitivity score indicates that it is better at distinguishing between true and false positives, resulting in fewer false alarms. This difference in sensitivity can be attributed to the unique architecture and design choices of GoogleNet, which incorporates initialization modules and batch normalization. Overall, the results suggest that GoogleNet may be the more appropriate choice for this particular task, but when considering the performance differences between the two models, AlexNet's lower memory usage and easy integration may compensate for this performance difference.

8 Results and future works

The paper proposes an approach using CNN and YOLO architectures to classify and object detection of helicopter images. Driven by the need for great precision and efficiency in practical uses such military operations, search and rescue missions, and civil aviation, the study comprises GoogleNet and AlexNet models to maximize performance under mentioned parameters, architectures and pipelines. In classification tests, the AlexNet-based model obtained a 73% F-1 score; the GoogleNet-based model obtained an F-1 score of 81%. Furthermore displaying a mean average precision (mAP) of 87% in object recognition, the YOLOv9c model highlighted the dependability of the suggested method. The study emphasizes the major contributions of data augmentation methods and transfer learning approaches in improving model performance. GoogleNet's advanced feature extraction via its deep architecture and inception modules complements AlexNet's efficient and simple design, ensuring high accuracy. This approach establishes a solid foundation for reliable helicopter component detection, proving its applicability across various domains. Future studies will seek to expand these approaches to include more complicated operating situations and a wider spectrum of aircraft. Including more varied and large-scale image collections in the dataset will help to improve the generalizability and robustness of the models. Advancing data augmentation methods is expected to help to improve model performance and resilience against various real-world conditions. To increase accuracy and efficiency in aircraft classification and detection tasks, next research will combine CNN architectures with more recent generation object detection algorithms. Moreover, the application of these models in emerging fields such autonomous navigation systems and intelligent air traffic management will be a focal point, where exact and reliable aircraft recognition is paramount. Continuous development and optimization of deep learning models are essential to provide more dependable and effective solutions for aircraft recognition

and detection, so contributing to advancements in aviation safety and operational efficiency.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interests.

Similarity rate (iThenticate): % 14

References

- [1] Anagün, Y., Işık, Ş., & Çakir, F. H. (2023). Surface roughness classification of electro discharge machined surfaces with deep ensemble learning. *Measurement*, 215, 112855. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112855>
- [2] Kurt, Z., Işık, Ş., Kaya, Z., Anagün, Y., Koca, N., & Çiçek, S. (2023). Evaluation of EfficientNet models for COVID-19 detection using lung parenchyma. *Neural Computing and Applications*, 35(16), 12121–12132. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08344-z>
- [3] Can, Z., Isik, S., & Anagun, Y. (2024). CVApool: using null-space of CNN weights for the tooth disease classification. *Neural Computing and Applications*, 36, 16567–16579. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09995-2>
- [4] Gozukara, G., Anagun, Y., Isik, S., Zhang, Y., & Hartemink, A. E. (2023). Predicting soil EC using spectroscopy and smartphone-based digital images. *Catena*, 231, 107319. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107319>
- [5] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *arXiv preprint arXiv:1506.02640*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>
- [6] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., ... & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**, 1–9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
- [7] Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25.
- [8] Wang, C. Y., Yeh, I. H., & Liao, H. Y. M. (2024). Yolov9: Learning what you want to learn using programmable gradient information. *arXiv preprint arXiv:2402.13616*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.13616>
- [9] Wu, Z. Z., Wan, S. H., Wang, X. F., Tan, M., Zou, L., Li, X. L., & Chen, Y. (2020). A benchmark data set for aircraft type recognition from remote sensing images. *Applied Soft Computing*, 89, 106132. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106132>
- [10] Rong, H. J., Jia, Y. X., & Zhao, G. S. (2014). Aircraft recognition using modular extreme learning machine. *Neurocomputing*, 128, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.12.064>
- [11] Zhao, C., Zhang, S., Luo, R., Feng, S., & Kuang, G. (2023). Scattering features spatial-structural association network for aircraft recognition in SAR

- images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 20, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3280442>
- [12] Wang, Y., Chen, Y., & Liu, R. (2022). Aircraft image recognition network based on hybrid attention mechanism. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022(1), 4189500. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113098>
- [13] Huang, X., Xu, K., Huang, C., Wang, C., & Qin, K. (2021). Multiple instance learning convolutional neural networks for fine-grained aircraft recognition. Remote Sensing, 13(24), 5132. <https://doi.org/10.3390/rs13245132>
- [14] Zhao, Y., Zhao, L., Li, C., & Kuang, G. (2020). Pyramid attention dilated network for aircraft detection in SAR images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 18(4), 662-666. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2981255>
- [15] Wu, Q., Feng, D., Cao, C., Zeng, X., Feng, Z., Wu, J., & Huang, Z. (2021). Improved mask R-CNN for aircraft detection in remote sensing images. Sensors, 21(8), 2618. <https://doi.org/10.3390/s21082618>
- [16] Zhang, F., Du, B., Zhang, L., & Xu, M. (2016). Weakly supervised learning based on coupled convolutional neural networks for aircraft detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(9), 5553-5563. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2569141>
- [17] Alkharji, N., Almazrouei, H., Alzaabi, S., Nassif, A. B., Elsalhy, M., & Talib, M. A. (2024). Aircraft-type classification using deep learning algorithms. *Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Systems (IS)*, Varna, Bulgaria, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IS61756.2024.10705261>





Malatya ilinde ICONA yöntemi ile CBS ve uzaktan algılama tabanlı erozyon risk analizi

Erosion risk analysis in Malatya province using the ICONA method based on GIS and remote sensing

Sevgi Bilgiç¹ , Selman Er^{2,*} 

^{1,2} İnönü Üniversitesi, 44280, Malatya Türkiye

Öz

Erozyon, toprağın su, rüzgâr ve insan faaliyetleriyle aşınması sürecidir ve tarım arazilerinin verimliliğini azaltarak çevresel ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Bu çalışmada, Malatya ilinin erozyon riskini belirlemek için ICONA yöntemi kullanılmıştır. ICONA, arazinin eğimi, litolojisi, arazi kullanımı ve vejetasyon yoğunluğu gibi parametreleri dikkate alarak risk haritaları oluşturmada etkin bir yöntemdir. Çalışma kapsamında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknikleri kullanılarak, Malatya'nın %20.17'sinin düşük, %64.99'unun orta ve %14.19'unun çok yüksek erozyon riski taşıdığı belirlenmiştir. Malatya'nın erozyon riski genellikle eğimin fazla olduğu alanlarda çok yüksek olarak çıkmıştır. Erozyon riskinin çok yüksek olduğu yerler ise Malatya ilinin kuzeyi ve güneyinde eğimli alanlarda yayılış göstermiştir. Ayrıca, eğimin olmadığı ancak litolojik özelliklere bağlı olarak aşınabilirliğin yüksek alanlar ise orta derecede erozyon riskinin olduğu alanlar olarak yayılış göstermiştir. Elde edilen bulgulara göre, erozyon riski, dik eğimler ve yetersiz bitki örtüsü ile karakterize edilen kuzey bölgelerinde yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bulgular, toprak koruma ve sürdürülebilir arazi yönetimi için rehber niteliğindedir. Bu çalışma, bölgesel erozyon riskinin anlaşılmasına katkı sağlamak ve benzer bölgelerde uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır. Doğal kaynakların korunması için alınacak önlemler bilimsel temellere dayandırılmalıdır.

Anahtar kelimeler: Erozyon riski, ICONA yöntemi, Coğrafi bilgi sistemleri, Toprak koruma

1 Giriş

Erozyon, dünyanın oluşumundan beri süregelen doğal bir süreçtir. Ancak insan faaliyetleri, özellikle yerleşim ve tarımsal amaçlarla fiziki çevreyi dönüştürmeye başladığında, bu süreç hız kazanmıştır [1]. Tarımsal faaliyetlerin yoğunlaşmasıyla erozyonun şiddeti artmış, bu da toprak verimliliğinde azalmaya ve su kaynaklarının kalitesinde bozulmalara yol açmıştır [2]. Sonuç olarak, verimsizleşen topraklar ve artan nüfusa yeterli ürün sağlanamaması gibi ekonomik ve sosyal sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu sorunlar hem insanları hem de karasal ekosistemleri olumsuz etkileyerek ekosistemin dengesini bozmuştur. Erozyon,

Abstract

Erosion is the process of soil degradation caused by water, wind, and human activities, leading to reduced agricultural productivity and significant environmental and economic challenges. In this study, the ICONA method was employed to assess erosion risk in the province of Malatya. ICONA is an effective approach for creating risk maps, taking into account parameters such as slope, lithology, land use, and vegetation density. Using Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) techniques, it was determined that 20.17% of Malatya is at low erosion risk, 64.99% at moderate risk, and 14.19% at very high risk. Areas with steep slopes were found to exhibit very high erosion risks. The regions with the highest erosion risk are predominantly located in the northern and southern parts of Malatya on sloped terrains. Conversely, areas with no slope but high erodibility due to lithological properties were identified as having moderate erosion risk. The findings indicate that erosion risk reaches critical levels in the northern regions, characterized by steep slopes and insufficient vegetation cover. These results provide guidance for soil conservation and sustainable land management. This study contributes to understanding regional erosion risks and offers a replicable method for similar regions. Measures to preserve natural resources should be based on scientific evidence.

Keywords: Erosion risk, ICONA method, Geographic information systems, Soil conservation

büyük ölçüde fiziki çevre unsurlarının özelliklerine bağlı olarak meydana gelmekte ve şiddeti de bu özellikler tarafından belirlenmektedir [3-5]. Eğimli, bitkiden yoksun ve zayıf toprak yapısına sahip alanlar erozyona daha yatkındır. Buna ek olarak, insanların araziyi kullanma biçimleri de erozyonu doğrudan etkilemektedir [6,7]. Türkiye'de coğrafi konumun getirdiği farklı iklim tipleri ve topografik yapı erozyon riskini artırır başlıca faktörlerdir. Kurak ve yarı kurak bölgelerde görülen düzensiz yağışlar ve ülkenin büyük bölümünün %40'tan fazla eğime sahip olması, Türkiye'de erozyon riskini artırmaktadır [8,9]. Erozyonun küresel bir çevresel sorun olması, bu konunun araştırmacılar

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: selmaner@gmail.com (S. Er)

Geliş / Received: 19.11.2024 Kabul / Accepted: 27.12.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1587977

tarafından yoğun olarak incelenmesine yol açmıştır. Erozyon çalışmaları, özellikle 1970'lerin ortalarından itibaren artmış ve bu durum, ulusal ve yerel ölçekte önlemler alınmasına zemin hazırlamıştır [10-13]. Erozyon riskini belirlemek ve bu riskin şiddetine göre planlamalar yapmak amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [14]. Arazide veya laboratuvarında yapılan ölçümler, teknik ve maddi kısıtlamalar nedeniyle son yıllarda daha az tercih edilmektedir [15]. Bunun yerine, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) tekniklerindeki gelişmelerle birlikte, risk haritaları oluşturarak modelleme yöntemleri yaygınlaşmıştır. Erozyon riskini belirlemek için kullanılan yöntemler arasında RUSLE, CORINE, LEAM, MEDALUS ve Dis4ME gibi çeşitli modeller bulunmaktadır [16-20]. Bu çalışmada, CBS ve UA tekniklerinden yararlanan ve erozyon risk modellemesinde sıkça kullanılan ICONA (Indicadores de Calidad del Suelo y Agua) yöntemi uygulanmıştır. ICONA, 1997 yılında İspanya Doğa Koruma Enstitüsü tarafından geliştirilmiş ve Akdeniz ile Avrupa ülkelerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Ülkemizde de bu yöntem farklı disiplinlerde tercih edilmektedir [1-3,21-25].

Malatya ili için erozyon durumunu tespit etmek amacıyla farklı yöntemler kullanılarak birtakım çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; [26] Malatya'nın güneydoğusunda bulunan Kaman Deresi'nin erozyon duyarlılığını tespit etmek amacıyla RUSLE yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, Kaman Deresi ve çevresinde bulunan yerleşmelerin erozyon duyarlılığının genellikle eğimin yüksek olduğu alanlarda arttığı tespit edilerek bununla alakalı önerilerde bulunulmuştur. Farklı bir alanda çalışılmış olan [27] Malatya'nın Pütürge ilçesinde bulunan Şiro Çayı'nın erozyon riskini belirlemek amacıyla RUSLE yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, alanın %25'inin aşırı yüksek erozyon duyarlılığına sahip olduğu sonucuna varıldı ve yıllık yaklaşık 25 ton toprak kaybının olduğu tespit edilmiştir.

Malatya ili içerisinde erozyon ile alakalı çalışmalar mevcuttur. Ancak yapılan çalışmalar belirli bir sahayı kapsadığından dolayı Malatya için genel bir erozyon riski ortaya konulmamıştır. Bu nedenle, Malatya ili genelindeki erozyon riski ile alakalı bir değerlendirmeyi amaçlayan bu çalışmada, CBS ve UA tekniklerinin yanı sıra ICONA yöntemi kullanılarak risk haritaları oluşturulmuştur. Bu çalışma, Malatya ilinin erozyon riskini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiş olup, CBS ve UA teknikleri kullanılarak ICONA yöntemi ile risk haritaları oluşturulmuştur.

2 Araştırma alanı

Malatya ili, genel itibarıyla Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat Bölümü'nde yer almaktadır. Yüz ölçümü yaklaşık 12265.56 km² alana tekabül etmektedir. Doğusunda Elâzığ ve Diyarbakır, batıda Kahramanmaraş, güneyde Adıyaman, kuzeyde Sivas ve Erzincan illeri yer almaktadır. Malatya, fiziki açıdan yüksek bir alana denk gelmekte ve ortalama yükseltisi yaklaşık 900 metre olup, kuzey-güney yönlü olarak artış göstermektedir (Şekil 1). Güneydoğu Toros kıvrımı içerisinde yer alan Beydağı kütlesi 2445 metre ile alanın en yüksek noktasına karşılık gelmektedir [28]. Yapısal olarak Malatya, Toros kıvrım kuşağının kuzeyinde

yer alması nedeniyle farklı dönemlerde oluşmuş çeşitli formasyonların bulunduğu bir alan olma özelliği göstermektedir. Alp Orojenezi sonrasında şekillenmiş ve 3. zaman sonunda tektonik hareketler sonucu kırılma ve kıvrılmalarla şekillenmeler olmuştur. Bu hareketler sonucu, Malatya'nın bazı alanları yükselmiş ve bazı alanları ise çökerek bir ova görünümü ortaya çıkmıştır. Çöküntü alanlarında ciddi aşınmalar nedeniyle alüvyonlarla dolmuştur. Bunun yanında, 3.zamana ait kalker, konglomera ve volkanik küller oldukça yaygındır. Ovanın kuzeyinde andezit lavlar ve yeşil-beyaz marnlar yayılım göstermektedir. Ovanın güneyinde ise Eosene ait kalker serileri görülmektedir. Ayrıca, 3.zamana ait konglomeralar ise bölgenin önemli akarsu kaynakları olan Tohma, Sultansuyu ve Kuruçay vadilerine boyunca görülmektedir [28,29]. Malatya, Doğu Anadolu Bölgesi'nde olmasına rağmen, bölgenin genelinde yaygın olarak görülen karasal iklim koşullarından bazı farklılıklar gösterir. Bu farklılığın nedeni, Malatya'nın Doğu Anadolu'daki diğer alanlara göre daha alçak bir irtifada yer almasıdır. Kurak ve yarı kurak iklim özellikleri taşıyan Malatya'da 13.7 °C yıllık ortalama sıcaklık vardır. En düşük sıcaklıklar ocak ayında görülmekte olup, ocak ayı ortalama sıcaklığı -1°C'dir (Şekil 2). En sıcak ay ise temmuzdur ve temmuz ayı ortalaması 26.8°C'dir. Yağış bakımından Malatya yıllık ortalama 300-400 mm civarında yağış almaktadır. Bu yağış değerleri, yükseltinin artmasına göre artıp azalmaktadır. Ayrıca, en fazla yağışı ilkbahar ve sonbahar aylarında almaktadır [29-31]. Fırat Nehri, araştırma alanının fiziki olarak şekillenmesinde büyük rol oynayan en önemli akarsu kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Kaynağını dağlık alanlardan alan ve Fırat Nehri'nin kollarını oluşturan Kuruçay, Tohma ve Sultan Suyu bölgede başta tarım faaliyetleri açısından önemli su kaynaklarından olup, Karakaya Baraj Gölü'ne dökülmektedir. Akarsuların iklimin özelliğiyle paralel olarak ilkbahar mevsimlerinde akım değerleri maksimum seviyeye çıkarken, buna karşın yaz aylarında en az seviyeye inmektedir. Malatya yeraltı suyu bakımından da önemli bir alana karşılık gelmektedir. Başta yeraltı suyunu sağlayan Beylerderesi, Aydoğan dere ve Orduzu dereleri oldukça önemlidir. Ayrıca bu suların özellikle faylar ve geçirimsiz geçirimsiz formasyonların olduğu alanlarda yeryüzüne çıktığı noktada önemli kaynakların (Elemendik, İnekpınarı, Horata vb.) olduğu görülmektedir [17]. Araştırma alanı, İrano-Turaniyen Fitocoğrafya Bölgesi içinde yer almakta olup, bitki örtüsü ağırlıklı olarak step karakterindedir. Bu gerçek step alanında kuraklığa ve soğuk hava koşullarına dayanıklı bitki türleri yaygın olarak bulunur. Geçmişte önemli ölçüde ormanlarla kaplı olan Malatya toprakları, şehirleşmenin etkisiyle birlikte zamanla doğal bitki örtüsünü kaybetmiştir. Bugün Malatya topraklarının yaklaşık %30'u ormanlık ve fundalıklarla, %10'u ise çayır ve meralarla kaplıdır. Malatya'nın güneyindeki dağlar, çoğunlukla meşe egemenliğinde bozuk nitelikli korular ve baltalıklarla kaplıdır. Özellikle batıda, Sultansuyu Vadisi yamaçlarında kızılıçık gibi bitkilere de rastlanır. Malatya Ovası ve çevresindeki düzlükler zengin çayır otlarıyla kaplı olup, bu kesimde doğal bitki örtüsü büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Dağlık ve platoluk alanlarda yer yer yabancı meyve ağaçları,

kavak ve söğütler görülürken, bitkisel üretim yapılan alanlarda sebze bahçeleri (domates, biber, lahana vb.), meyve bahçeleri (kayısı, kiraz, ceviz, elma vb.), üzüm bağları ve fidanlıklar bulunmaktadır. Malatya'nın kuzeyindeki dağlar ise, meşe ağırlıklı yapraklı ormanlara sahiptir ve bitki örtüsü açısından daha zengindir. Bölgede dere ve su kenarlarında kavak ve söğüt gibi su isteği yüksek karakterde bitkiler bulunmaktadır [32]. Bu çeşitlilik, Malatya'nın iklimsel geçiş özelliklerinin bitki örtüsü üzerindeki etkisini yansıtmaktadır [30,31].

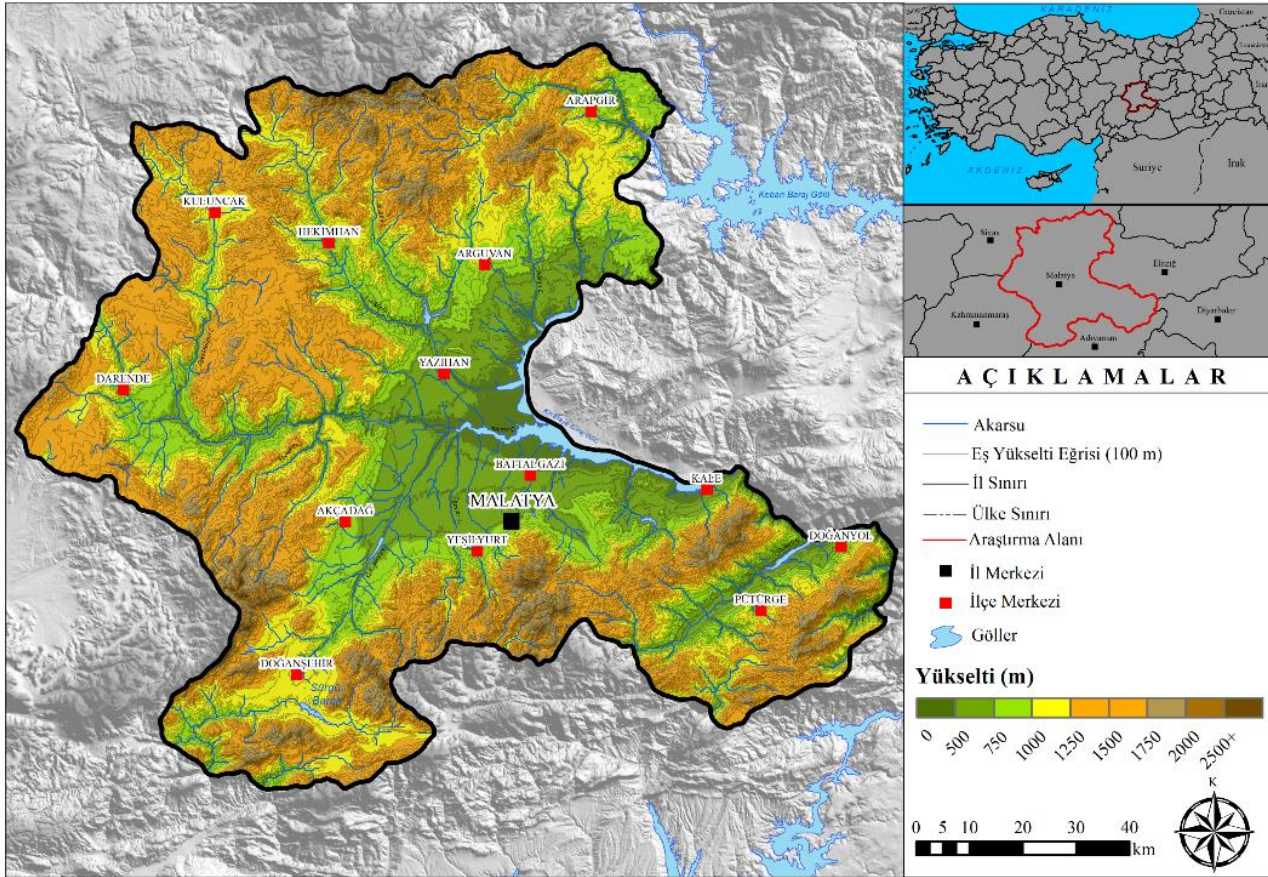
3 Materyal ve yöntem

Malatya ilinin, erozyon riskini belirlemek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan ICONA yöntemi tercih edilmiştir. ICONA temelde arazinin toprak aşınımı ve korumasını ele almaktadır. Toprak aşınımı arazinin eğim ve litolojik yapısının ilişkisiyle belirlenirken, toprak koruma ise arazinin kullanımı ve vejetasyon örtüsünün sıklığının ilişkisiyle belirlenmektedir (Şekil 3).

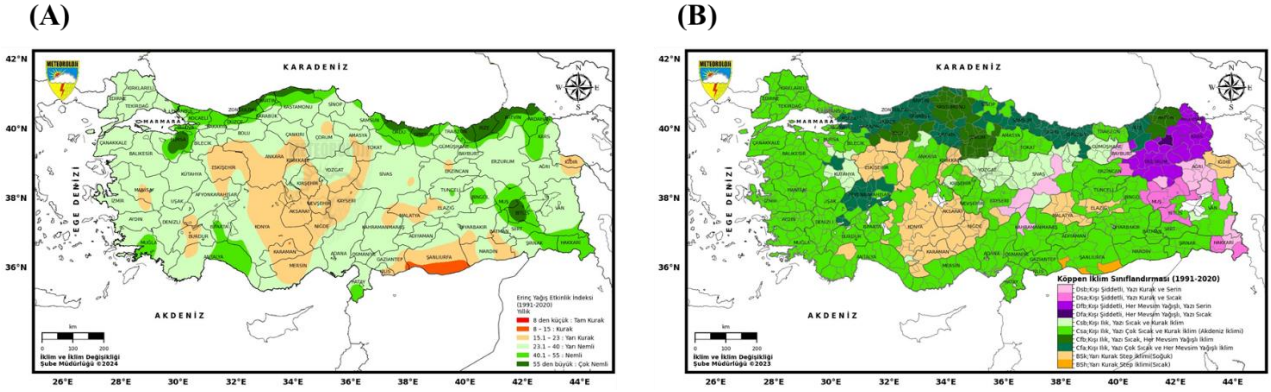
3.1 Toprak aşınımı

Toprak aşınımı, ICONA yönteminde eğim ve litolojinin birlikte ele alınmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bunun için öncelikle alanın eğim ve litoloji özellikleri belirlenmiştir. Araştırma alanının, eğim özelliklerini belirlemek amacıyla

ASF (Alaska Satellite Facility) tarafından temin edilen Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) (12.5 metre çözünürlükte) kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonrasında literatür incelemesiyle alanın eğim derecelerine göre 1'den 5'e (1: Çok az eğimli, 5: Çok dik) kadar sınıflara ayrılmıştır (Tablo-1). Araştırma alanının toprak aşınımında önemli faktör olan litolojik özellikleri belirlemek için Maden Tetkik Arama (MTA) tarafından temin edilen 1/500.000 ölçekli Sivas ve Erzurum jeoloji haritaları sayısallaştırılarak kullanılmıştır [33]. Aynı şekilde, literatürden faydalanılarak litolojik özellikler aşınım durumuna göre 5 gruba ayrılmıştır (Tablo 2). Toprak aşınım matrisi, eğim ve litoloji parametrelerinin etkileşimiyle belirlenmektedir. Erozyon riski, eğimin yüksek olduğu alanlarda anakayanın aşınabilirlik seviyesine bakılmaksızın yüksektir; bu nedenle, eğim, aşınılma faktörü açısından öncelikli olarak dikkate alınması gereken bir parametredir. Başka bir deyişle, anakayanın düşük aşınabilirlik özelliğine sahip olması, tek başına bir alanın erozyon riskini azaltmada yeterli bir faktör değildir. (Tablo 3). Bu işlemler, CBS yazılımlarından ArcMap 10.8 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ArcMap 10.8 yazılımının mekanik süreçler için tercih edilmesinin nedeni, veri görselleştirme ve analiz özelliklerinin çalışma için uygun olmasıdır.

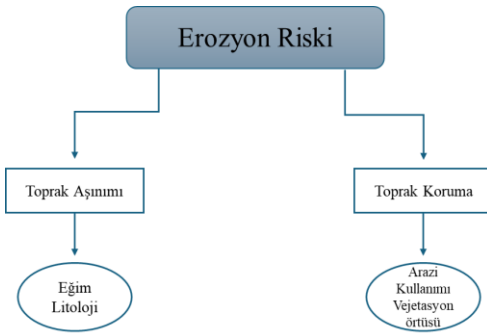


Şekil 1. Araştırma alanı lokasyon haritası



Şekil 2. Türkiye iklim sınıflandırması; (A) Erinç iklim sınıflandırması, (B) Köppen iklim sınıflandırması [30]

Alanın eğim ve jeoloji haritaları oluşturulduktan sonra, bu iki coğrafi veri ArcGIS'te "Spatial Join" (Mekânsal Birleştirme) aracı ile birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi sonucunda, öz nitelik tablosunda yeni bir katman oluşturulmuş ve karşılaştırma matrisi manuel olarak düzenlenmiştir.



Şekil 3. ICONA yöntemi akış şekli

Tablo 1. Eğim sınıfları

NO	Eğim Değerleri (%)	Tanım
1	0-3	Çok Az Eğimli
2	3-12	Orta Eğimli
3	12-20	Eğimli
4	20-35	Dik
5	35+	Çok Dik

Tablo 2. Litoloji sınıflandırması

Kod	Tanım
A	Çok sert kayalar
B	İyi kaynaşmış kalker kayalar
C	Kompakt silisli kayalar
D	Az dayanıklı kayalar ve yumuşak formasyonlar
E	Killer, siltler, kumlar ve dördüncü zamana ait depolar

Tablo 3. Toprak aşınma matrisi (1: Çok az aşınabilirlik, 5: Çok yüksek aşınabilirlik)

Eğim Kod	Jeoloji Sınıflandırması				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	3	3
3	2	2	3	4	4
4	3	3	3	4	5
5	4	4	5	5	5

3.2 Toprak koruma

Toprak koruma, arazi kullanım ve vejetasyon örtüsünün yoğunluğunun birlikte değerlendirilmesidir. Çalışma alanının arazi kullanımını belirlemek amacıyla Copernicus tarafından oluşturulan CORINE 2018 (Coordination of Information on Environment) verileri kullanılmıştır. Arazi kullanım sınıfları belirlenerek 6 sınıfa ayrılmıştır (Tablo 4). Daha sonrasında bitki yoğunluğunu/ kapalılığını belirlemek amacıyla NDVI analizi kullanılarak bitki yoğunluğuna göre literatürden faydalanılarak 4 farklı grup belirlenmiştir (Tablo 5). NDVI analizi için USGS (United States Geological Survey) tarafından bulutluluk oranının az olmasına dikkat edilerek Eylül 2023 tarihli 3 farklı LANDSAT 8 OLI/TIRS görüntüsünden faydalanılmıştır. Uydu görüntülerinin 4-5 numaralı bant kombinasyonları kullanılarak çalışma alanının vejetasyon yoğunluğu belirlenmiştir. Tüm bu işlemler yapılırken ArcGIS 10.8 programından yararlanılmıştır. Arazi kullanımı ve vejetasyon örtüsü haritaları oluşturulduktan sonra aynı katmanda birleştirilerek tek öz nitelik tablosunda birleştirilmiştir. Daha sonrasında Tablo 6'da görülen parametrelerin birbirine göre karşılaştırılması yapılarak toprak koruma matrisi oluşturulmuştur. Literatür incelendikten sonra bitki örtüsünün arazi kullanımına göre erozyon riski açısından daha önemli olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Arazi sınıfları

Arazi Sınıfları	
1.	Kuru Tarım Alanları
2.	Meyve, Bağ, Bahçe Alanları
3.	Sulu Tarım Alanları
4.	Orman Alanları
5.	Çalı- Maki Alanları
6.	Mera ve Diğer Alanlar

Tablo 5. Bitki yoğunluğuna göre sınıflandırma

No	Tanım	Değer Aralığı (%)
1	Az yoğun	0-25
2	Orta	25-50
3	Yoğun	50-75
4	Çok yoğun	75-100

Tablo 6. Toprak koruma matrisi (1: Maksimum Koruma 5: Minimum Koruma)

Arazi Kullanım Sınıfları	Bitki Yoğunluğu			
	1	2	3	4
1	5	5	4	4
2	5	5	4	3
3	3	2	1	1
4	3	3	2	1
5	5	4	3	2
6	5	4	3	2

3.3 Erozyon riski

ICONA yöntemi, alanın toprak aşınım ve toprak koruma düzeyi parametrelerini değerlendirmektedir. Malatya ilinin erozyon riski belirlenirken, önce bu iki parametre belirlenmiş ve ardından diğer işlemlerde olduğu gibi birleştirilmiştir. Aynı öznelik tablosunda birleştirilen parametreler, karşılaştırma matrisi aracılığıyla değerlendirilerek tek bir katmanda erozyon riski sonucunu verecek şekilde farklı bir katman olarak düzenlenmiştir (Tablo 7).

Tablo 7. ICONA yöntemi erozyon risk matrisi (1: Çok az erozyon riski 5: Çok şiddetli erozyon riski)

Toprak Aşınımı	Toprak Koruma Düzeyi				
	1	2	3	4	5
No					
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	3	4
3	1	2	3	4	4
4	2	3	3	5	5
5	2	3	4	5	5

4 Bulgular ve tartışma

4.1 Toprak aşınımı

Çalışma alanının toprak aşınım düzeyini belirlemek amacıyla eğim ve litoloji haritaları kullanılmıştır. Eğim sınıfları 5 kategoriye ayrılmış olup, 1 en az eğimli alanları, 5 ise en dik alanları temsil etmektedir (Tablo 8). Analizler sonucunda, çalışma alanının büyük bir kısmının %40.38 oranıyla orta eğimli, %21 oranıyla dik yamaçlardan oluştuğu tespit edilmiştir. Özellikle, güney ve kuzey bölgeler, çok dik ve dik eğimli yamaçlarla karakterize olmuştur. Düz veya eğimsiz alanlar ise genellikle vadi ve ova tabanlarında görülmektedir. Bu bulgular, çalışma sahasındaki topoğrafyanın büyük ölçüde eğimli arazilerden oluştuğunu göstermektedir.

Tablo 8. Eğim sınıflarının dağılımı

Eğim Değerleri (%)	Tanım	Alan (km ²)	Yüzde (%)
0-3	Çok Az Eğimli	1434.37	11.69
3-12	Orta Eğimli	4952.38	40.38
12-20	Eğimli	3058.52	24.94
20-35	Dik	2576.18	21.00
35+	Çok Dik	244.11	1.99
TOPLAM		12265.56	100

Toprak aşınımını belirlemek amacıyla bir diğer faktör olan litoloji sınıfları için ise 5 sınıf belirlenmiştir. Sınıflar aşınım özellikleri açısından en sert olandan, en yumuşak aşınmaya en elverişli kayalar olmak üzere sınıflandırılmıştır (Tablo 9).

Tablo 9. Litoloji sınıflarının dağılımı

Tanım	Kod	Alan (km ²)	Yüzde
Çok Sert Kayalar	A	3832.19	31.62
İyi Kaynaşmış kalker kayalar	B	1843.51	14.95
Kompakt Silisli Kayalar	C	1196.10	9.7
Az dayanıklı kayalar ve yumuşak formasyonlar	D	2973.97	24.11
Killer, siltler, kumlar ve dördüncü zamana ait depolar	E	2419.79	19.62
TOPLAM		12265.56	100

Analiz sonucunda, çalışma alanının %31.62 oranla aşınım düzeyi az olan kayalar dağılımı göstermiştir. Bunun yanında %24.11 oranla az dayanıklı kayalar ve %19.62 oranla kuvaternere ait depolar yayılımı göstermiştir. Yüksek aşınımına sahip ve genellikle kuvaterner zamana ait depoların ise çalışma alanının doğusunda yayılımı gösterdiği görülmektedir. Eğim ve litoloji özellikleri belirlendikten sonra, iki faktör karar matrisi kullanılarak toprak aşınımı değerlendirilmiş ve tek bir katman halinde toprak aşınım haritası oluşturulmuştur (Şekil 3). Analizler sonucunda, çalışma alanının %41.39'unun orta aşınabilirlik seviyesinde olduğu tespit edilmiştir (Tablo 10). Ayrıca, özellikle çalışma alanının kuzey kesimlerinde çok yüksek aşınabilirlik gösteren bölgeler dikkat çekmektedir. ICONA yöntemi, erozyon riskini değerlendirme matrisinde eğim faktörüne, litolojiye kıyasla daha fazla önem atfetmektedir (Tablo 3). Bu nedenle, eğimin yüksek olduğu bölgelerde aşınabilirliğin de arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle %20 ve %35'in üzerinde eğime sahip alanlarda toprak aşınımı yoğunlaşmaktadır (Şekil 3). Şehrin kuzeyindeki Darendede ve Hekimhan ilçelerinde, eğimle doğru orantılı olarak, doğu-batı yönünde ise Akçadağ ilçesinde toprak aşınımı yüksek seviyelerde seyretmektedir (Şekil 3).

Tablo 8. Toprak aşınım sınıflarının dağılımı

Tanım	Kod	Alan (km ²)	Yüzde (%)
Çok Az Aşınabilirlik	1	2472.17	20.16
Az Aşınabilirlik	2	2964.06	24.16
Orta Aşınabilirlik	3	5077.40	41.39
Yüksek Aşınabilirlik	4	1572.98	12.82
Çok Yüksek Aşınabilirlik	5	178.95	1.46
Toplam		12265.56	100

4.2 Toprak koruma

Araştırma alanının toprak koruma düzeyini belirlemek amacıyla arazi kullanım sınıfları ve bitki örtüsü yoğunluğundan yararlanılmıştır. Arazi kullanım sınıfları 6 ana kategoriye ayrılmıştır (Tablo 11). Bu sınıflandırma sonucunda, mera ve diğer alanlar (yerleşim yerleri, su

kütleleri, yapay alanlar, çıplak araziler vb.), %56.01 oranıyla çalışma alanında en geniş yayılım gösteren sınıf olmuştur. Öte yandan, sulu tarım ve orman alanları, arazi kullanım sınıfları içerisinde en küçük alanı kaplayan kategoriler arasında yer almaktadır. Bu alanlar genellikle çalışma bölgesinin güneyinde, Doğanyol ve Pütürge ilçelerine yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır.

Tablo 9. Arazi sınıflarının dağılımı

Tanım	Kod	Alan (km ²)	Yüzde (%)
Kuru Tarım Alanları	1	2240.41	18.25
Meyve, Bağ, Bahçe Alanları	2	742.75	6.05
Sulu Tarım Alanları	3	91.82	0.75
Orman Alanları	4	106.28	0.86
Çalı- Maki Alanları	5	2219.63	18.08
Mera ve Diğer Alanlar	6	6864.67	56.01
Toplam		12265.56	100

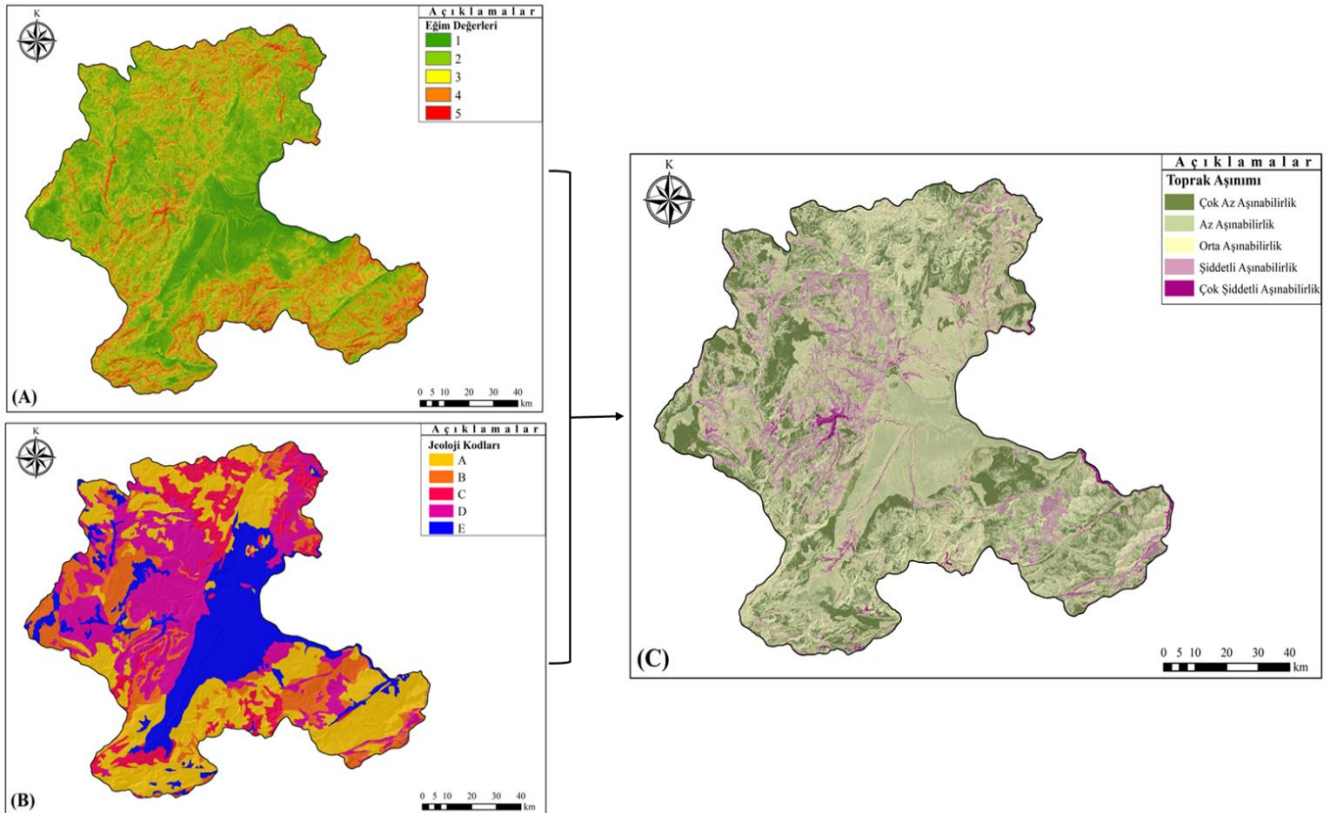
Ayrıca, %18.25 oranla önemli bir dağılım gösteren kuru tarım alanları, çalışma alanının özellikle kuzey kesiminde yayılım göstermektedir (Şekil 4). Arazi kullanım sınıfları belirlendikten sonra, NDVI kullanılarak çalışma alanının bitki örtüsü yoğunluğu analiz edilmiş ve 4 sınıfa ayrılmıştır (Tablo 12). Genel olarak bitki yoğunluğunun çok fazla olmadığı bir alanı kapsayan çalışma bölgesi, %54.65 oranında

orta yoğunluk sınıfında yer almaktadır. Bitki yoğunluğunun en fazla olduğu alanlar, özellikle doğu, güneybatı ve güneydoğuda yoğunlaşmıştır. Ayrıca, bitki yoğunluğunun akarsu ağlarını takip eden bir yayılım gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 5).

Tablo 10. Bitki sınıflarının dağılımı

Tanım	Alan (km ²)	Yüzde (%)
Az yoğun	2431.23	19.81
Orta	6699.7	54.65
Yoğun	2254.01	18.37
Çok yoğun	880.62	7.17
Toplam	12265.56	100

Arazi kullanım sınıfları ve vejetasyon örtüsü belirlendikten sonra tek bir katmanda birleştirilerek çalışma alanının toprak koruma düzeyi belirlenmiştir. Toprak koruma düzeyi 1'den 5'e kadar 5 sınıfa ayrılarak değerlendirilmiştir (Tablo 13). 1- Maksimum Koruma düzeyini gösterirken 5- Minimum Koruma düzeyini ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, alanın %38.20 oranla orta koruma özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, %30.13 oranla düşük ve %25.66 oranla ise minimum koruma derecesine sahip olduğu görülmektedir. Alanın maksimum olarak korunma düzeyinin az alanlarda dağılım gösterdiği de ayrıca görülmektedir.



Şekil 3- A) Eğim, (B) Litoloji, (C) Toprak Aşınım Harita

Tablo 11. Toprak koruma düzeyinin dağılımı

Tanım	Kod	Alan (km ²)	Yüzde (%)
Maksimum Koruma	1	53.60	0.44
Yüksek Koruma	2	684.68	5.58
Orta Koruma	3	4680.44	38.20
Düşük Koruma	4	3697.69	30.13
Minimum Koruma	5	3149.15	25.66
Toplam		12265.56	100

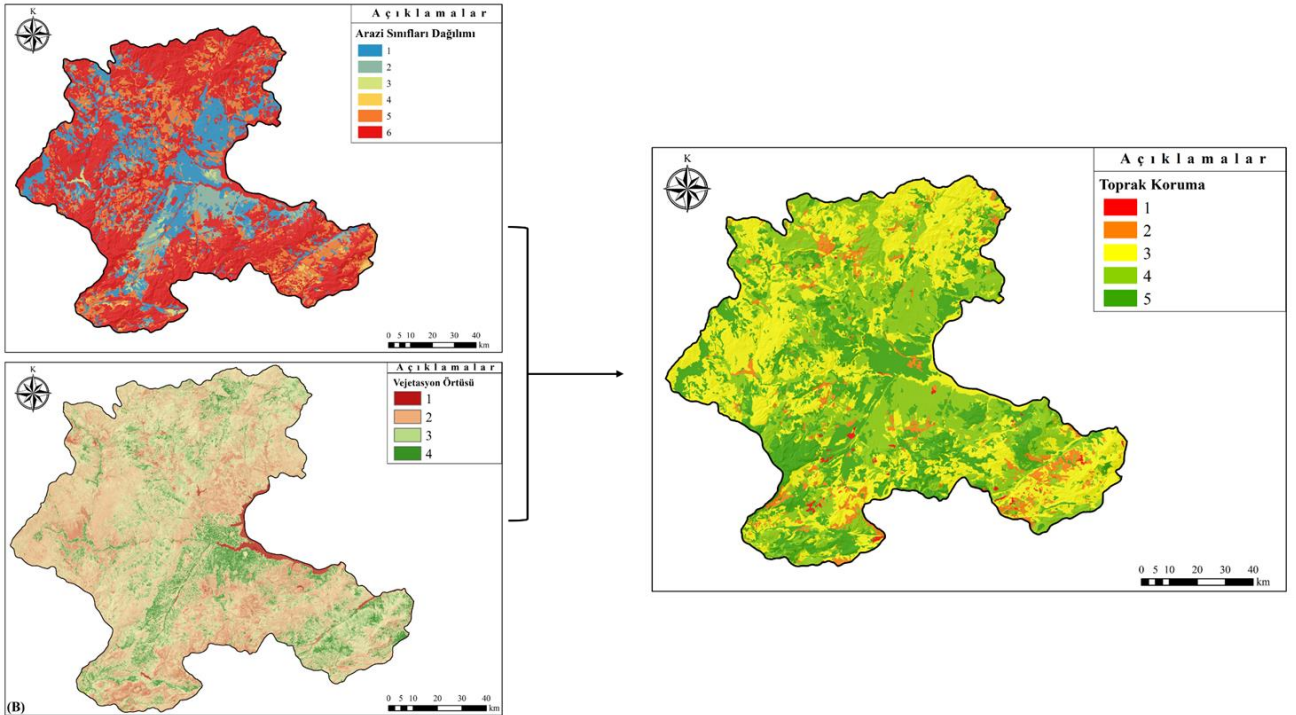
Toprak aşınım ve korunma düzeyi haritaları, diğer analiz adımlarında olduğu gibi erozyon riski karar verme matrisine uygun olarak tek bir katmanda birleştirilmiş ve çalışma alanının erozyon riski sonuç haritası elde edilmiştir. Erozyon riski, 1'den 5'e kadar beş kategoriye ayrılmıştır; 1 en düşük erozyon riskini, 5 ise en yüksek erozyon riskini temsil etmektedir (Tablo 14). Yapılan analiz sonucunda, araştırma alanının %14.19'unun çok yüksek erozyon riski taşıdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma alanının yaklaşık %65'lik bir bölümü orta seviyede erozyon riski taşımaktadır.

Tablo 12. Erozyon riskinin dağılımı

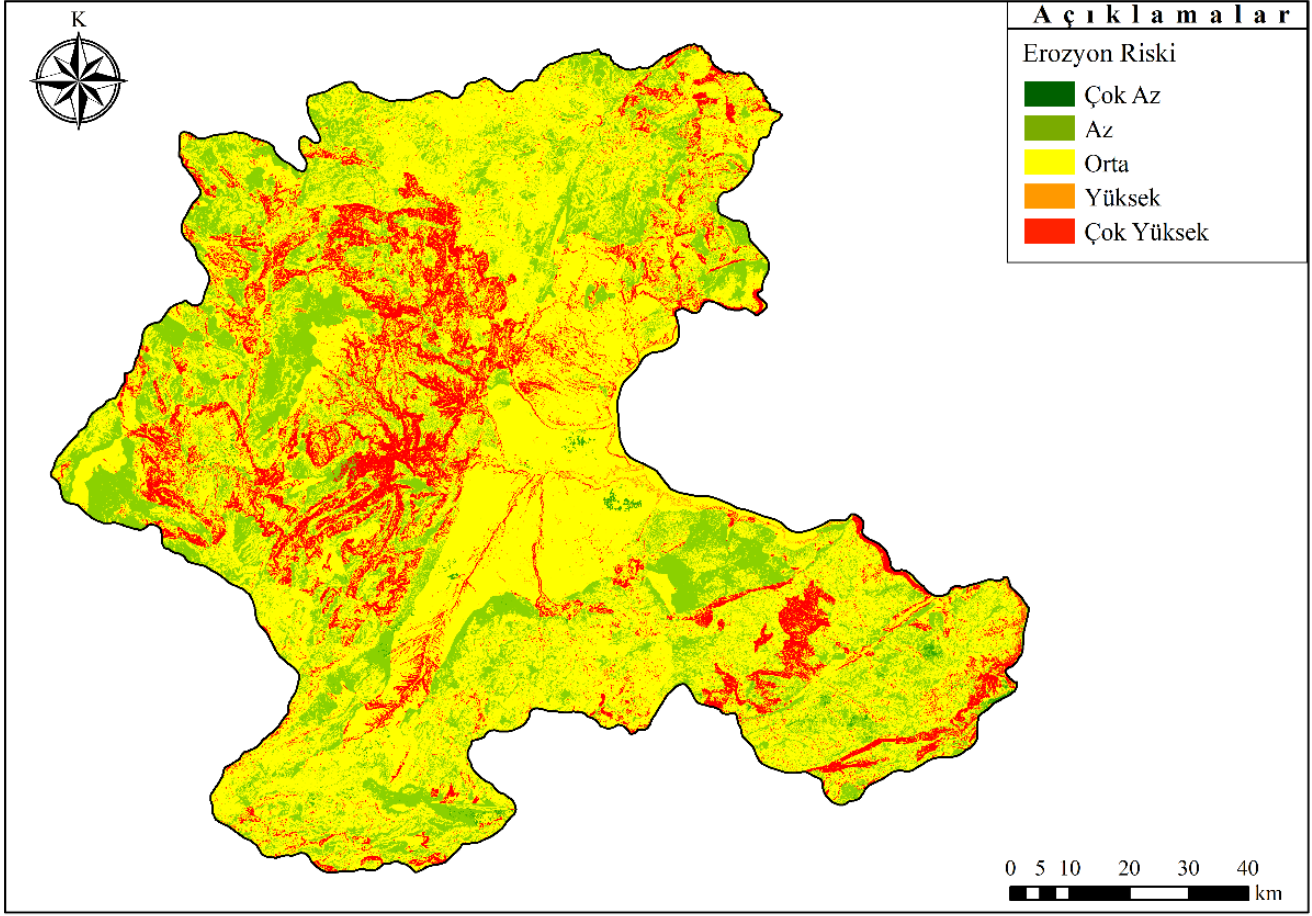
Tanım	Kod	Alan (km ²)	Yüzde (%)
Çok Az	1	4.89	0.4
Az	2	247.33	20.17
Orta	3	796.95	64.99
Yüksek	4	2.98	0.24
Çok Yüksek	5	174.03	14.19
Toplam		12265.56	100

Sonuç haritasında, özellikle çalışma alanının orta ve kuzey kesiminde Darende, Hekimhan ve Akçadağ ilçelerinde erozyon riskinin çok yüksek olduğu

gözlemlenmiştir. Bu durum, bu bölgede eğimin fazla, bitki örtüsünün ise seyrek veya tamamen olmamasından kaynaklanmaktadır. ICONA yönteminin eğim ve bitki örtüsü kriterlerini diğer faktörlere kıyasla daha ön planda tutması, elde edilen sonuçların doğruluğunu pekiştirmiştir. Bunun yanı sıra, erozyon riskinin çok yüksek olduğu alanların litoloji bakımından yüksek aşınım eğilimli bölgelerle örtüştüğü dikkat çekmektedir (Şekil 5). Tüm bu faktörler birbiriyle etkileşerek çalışma sahasındaki erozyon riskinin dağılımını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular ve Malatya'nın fiziki özellikleri değerlendirildiğinde, ICONA yönteminin bu bölgeye uygulanabilirliği oldukça uygundur. Malatya ili, yüksek eğimli araziler, çeşitli litolojik yapılar ve kurak-yarı kurak iklim koşulları ile karakterize edilmekte olup, bu faktörler erozyon riskini belirleyen temel unsurlardır. ICONA yöntemi, eğim, litoloji, arazi kullanımı ve bitki örtüsü yoğunluğu gibi parametreleri dikkate alarak, bölgenin erozyon riskini doğru bir şekilde modellemiş ve literatürle uyumlu sonuçlar vermiştir. Literatürde Malatya ilinin tamamını kapsayan bir erozyon riski analizi çalışması bulunmamakla birlikte, bölgesel çalışmalar mevcuttur. Bu çalışma, [34] tarafından yapılan Malatya'daki Darende Ovası'na dair erozyon analizlerinin sonuçlarıyla büyük ölçüde uyum göstermektedir. Ancak, bu çalışmada tüm il genelinde bir değerlendirme yapılmış olup, bulgular daha geniş bir coğrafi alana yayılmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, ICONA yöntemiyle elde edilen toprak aşınım sonuçlarıyla büyük ölçüde uyumludur. Her iki çalışmada da bölgedeki yüksek eğimin toprak oluşum süreçlerini zorlaştırdığı ve bu nedenle alanın erozyon açısından yüksek risk taşıdığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4- (A) Arazi örtüsü sınıfları, (B)Vejetasyon örtüsü, (C)Toprak koruma



Şekil 5- Erozyon risk sonuç haritası

Benzer şekilde, [35] tarafından yapılan “Malatya Kuzeydoğusunda Ballı ve Memikan Dereleri Arasındaki Sahanın Erozyon Duyarlılık Analizi” çalışması, bölgenin dar bir kısmında erozyon riskini incelemiştir. Bu çalışma, sahadaki topografya ve iklim özelliklerini dikkate alarak, parametrelerin önem derecesine göre ağırlıklandırma yapmış ve %37 oranında yüksek erozyon riski taşıyan alanları tespit etmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek eğimli ve bitki örtüsünden yoksun alanların erozyon riski taşıdığı ve bu alanlarda acil toprak koruma önlemleri alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, özellikle ormanlaştırma ve teraslama yöntemlerinin uygulanabilirliği üzerinde daha fazla durulabilir.

5. Sonuç ve öneriler

Erozyonun, toprağın üst tabakasının kaybına yol açarak tarım arazilerinin verimliliğini azalttığı ve su kaynaklarını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, erozyon riskinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve sürdürülebilir arazi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Malatya ili ise, yüksek eğimli arazileri, farklı litolojik yapıları ve kurak-yarı kurak iklim özellikleriyle toprak kaybı açısından elverişli bir alan olma özelliği göstermektedir. Bu nedenle çalışmada, Malatya ili genelinde erozyon riskini belirlemek amacıyla ICONA yöntemi

kullanılmıştır. Bulgular, Malatya ilindeki erozyon riskinin büyük ölçüde eğim ve bitki örtüsünün durumuna bağlı olduğunu göstermiştir. Özellikle şehrin kuzeyinde, eğimin fazla olduğu ve bitki örtüsünün yetersiz olduğu alanlarda erozyon riski çok yüksek çıkmıştır. Bu bölgelerde, toprağın aşınması ve taşınması süreci hızlanmakta, bu da toprak kaybına ve yerel ekosistemlerin dengesinin bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca, erozyon riski orta ve yüksek düzeyde olan alanların geniş bir kısmı, tarım arazileri ve yerleşim bölgelerine yakın olması nedeniyle dikkat çekicidir.

ICONA yöntemi, bölgenin fiziki özelliklerini dikkate alarak, Malatya ili gibi yüksek eğimli ve kurak-yarı kurak iklim özelliklerine sahip bölgelerde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yöntemin eğim, litoloji, arazi kullanımı ve bitki örtüsü yoğunluğu gibi parametreleri bütüncül bir yaklaşımla ele alması, risk haritalarının doğruluğunu artırmıştır. ICONA yöntemi, özellikle benzer iklim ve topografyaya sahip diğer bölgelerde de uygulanabilecek etkin bir modelleme aracı olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, Malatya ilinde erozyon riskini belirlemek için ICONA yönteminin etkinliğini göstermiştir. Bu bulgular, özellikle yüksek erozyon riski taşıyan bölgelerde yerel yönetimlerin hızla toprak koruma önlemleri alması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu önlemler arasında ağaçlandırma projeleri, teraslama uygulamaları ve örtü

bitkisi kullanımı yer alabilir. Tarım sektöründe ise çiftçilere yönelik eğitim programları düzenlenmeli, toprak koruma stratejileri konusunda bilinç artırılmalıdır. Bu bağlamda, sürdürülebilir tarım uygulamalarına yönelik teşvikler sağlanmalı ve yerel halkın aktif katılımı desteklenmelidir. Örneğin; damla sulama sistemi yaygınlaştırılmalıdır. Ayrıca, erozyonun şiddetli olduğu alanlarda sürdürülebilir arazi yönetim planlarının devreye sokulması büyük önem taşımaktadır. Özellikle yerel yönetimlerin, bu riskli bölgelerde erozyon kontrolü ve doğal kaynakların korunmasına yönelik projeleri hızlandırması gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, Malatya ili genelinde erozyon riskinin yüksek olduğu alanları net bir şekilde ortaya koymuş ve bu alanlarda acil müdahale gerekliliğini vurgulamıştır. Elde edilen bulgular, yerel yönetimler ve tarım sektörü için önemli bir rehber sunmakta olup, erozyonun olumsuz etkilerini minimum seviyeye indirmek için alınacak önlemlerin belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, çalışmada multidisipliner bir yaklaşımın gerekliliği vurgulanarak, bu sonuçların daha kapsamlı ve sürdürülebilir çözümlere olanak sağlayacağı ortaya konulmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] G. Gündüzoğlu ve H. Çukur, Kıyı Ege Bölümünde Erozyon Riskinin ICONA Yöntemi ile Belirlenmesi, Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi, no. 79, pp. 596-614, 2018.
- [2] R. Halbac-Cotoara-Zamfir, D. Smiraglia, G. Quaranta, R. Salvia, L. Salvati, and A. Giménez-Morera, Land Degradation and Mitigation Policies in the Mediterranean Region: A Brief Commentary, Sustainability, vol. 12, no. 20, art. 8313, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12208313>
- [3] O. Dengiz and S. Akgül, Soil Erosion Risk Assessment of the Gölbaşı Environmental Protection Area and Its Vicinity Using the CORINE Model, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, vol. 29, no. 6, pp. 439-448, 2005.
- [4] S. Issaka and M. A. Ashraf, Impact of soil erosion and degradation on water quality: A review, Geology, Ecology, and Landscapes, vol. 1, no. 1, pp. 1-11, 2017. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301053>
- [5] H. Esmaili Gholzom, H. Ahmadi, A. Moeini, and B. Motamed Vaziri, Erosion risk assessment and identification of susceptibility lands using the ICONA model and RS and GIS techniques, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions [preprint], 2020. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-85>.
- [6] B. Yılmaz, Türkiye’de Erozyonun Tarım Sektörü Üzerindeki Etkileri ve Alınan Önlemler. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2001
- [7] V. Hanedar, Dünyada ve Türkiye’de Erozyon. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
- [8] T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Erozyonla Mücadele Eylem Planı (2013-2017). Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.
- [9] E. Atabey, Erozyon ve İklim Değişikliği, Temiz Mekân Web Sitesi. [Online]. Available: <https://www.temizmekan.com/erozyon-ve-iklimdegisikligi/> [Accessed: 18-Nov-2024].
- [10] P. Borrelli, D. A. Robinson, L. R. Fleischer, E. Lugato, C. Ballabio, C. Alewell, and P. Panagos, An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion, Nature Communications, vol. 8, art. 2013, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- [11] P. Borrelli, C. Alewell, P. Alvarez, and P. Panagos, Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis, Science of The Total Environment, vol. 780, art. 146494, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>.
- [12] S.A. Prats, Ó. González-Pelayo, F.C. Silva, K.J. Bokhorst, J.E.M. Baartman, and J.J. Keizer, Post-fire soil erosion mitigation at the scale of swales using forest logging residues at a reduced application rate, Earth Surface Processes and Landforms, vol. 44, no. 14, pp. 2837-2848, 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4711>.
- [13] M. Alizadeh, H. Zabihi, I.D. Wolf, et al., Remote sensing technique and ICONA-based GIS mapping for assessing the risk of soil erosion: A case of the Rudbar Basin, Iran, Environmental Earth Sciences, vol. 81, art. 512, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10634-z>.
- [14] O. Dengiz, A. İmamoğlu, F. Saygın ve C. Göl, İnebolu Havzası’nın ICONA Modeli ile Toprak Erozyon Risk Değerlendirmesi, Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, vol. 29, no. 2, pp. 136-142, 2014. <https://doi.org/10.7161/anajas.2014.29.2.136-142>.
- [15] E. Karas, İ. Oğuz, E. Türkseven ve S. Keskin, Sakarya-Porsuk-Sarısu-Havzasında CORINE, LEAM ve USLE Metodolojilerinin Kullanılarak Erozyon Risk Haritalarının Hazırlanması, I. Ulusal Kuraklık ve Çölleşme Sempozyumu, Turkey, 2009.
- [16] M.A. Özdemir ve S. Tatar Dönmez, CBS Tabanlı Rusle Yöntemiyle Işıklı Gölü Havzasının Erozyon Risk Analizi, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, vol. 8, no. 1, pp. 1-21, 2016. <https://doi.org/10.15659/hartek.16.03.122>.
- [17] M. Sunkar, Ü. Hatun ve A. Toprak, Malatya Havzası ve Çevresinde İklim Özelliklerinin Meyveciliğe Etkisi, GEOMED 2013: 3. Uluslararası Coğrafya Sempozyumu, pp. 566-574, 2013.
- [18] T. Everest and H. Özcan, Dürmek Havzası Mansap Bölümü Erozyon Riskinin CORINE Yöntemi ile Belirlenmesi, COMU Journal of Agriculture Faculty, vol. 5, no. 1, pp. 39-47, 2017.
- [19] T. Everest, A. Sungur ve H. Özcan, MEDALUS Yöntemi Kullanılarak Karacabey Tarım İşletmesi Toprak Kalite İndeksinin Değerlendirilmesi, Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, vol. 7, pp. 120-131, 2020. <https://doi.org/10.30910/turkjans.680030>.

- [20] E.H. Gholzom, H. Ahmadi, A. Moeini, and B. Motamedvaziri, Soil erosion risk assessment in the natural and planted forests using ICONA model and GIS technique, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 3947-3962, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03536-3>.
- [21] İ. Bayramin, O. Dengiz, O. Başkan, and M. Parlak, Soil Erosion Risk Assessment With ICONA Model: Case Study: Beypazarı Area, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 27, no. 2, pp. 105-116, 2003.
- [22] A. Aydın and H. B. Tecimen, Temporal soil erosion risk evaluation: A CORINE methodology application at Elmalı dam watershed, Istanbul, *Environmental Earth Sciences*, vol. 61, no. 7, pp. 1457-1465, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0461-2>.
- [23] S. Ediş, İ. Aytas ve A. U. Özcan, ICONA modeli kullanarak toprak erozyon riskinin değerlendirilmesi: Meşeli (Çubuk/Ankara) Havzası Örneği, *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 15-22, 2021. <https://doi.org/10.53516/ajfr.948519>.
- [24] H. Özvan, B. Arik, O. Satır ve P. Aslantaş, Bendimahı Alt Havzası Potansiyel Erozyon Riskinin CORINE ve ICONA Modelleri Kullanılarak Haritalanması, *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, vol. 26, pp. 389-404, 2022. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1128828>.
- [25] H. Dutal, Determination of The Impact Of Forest Fires On Soil Erosion Risk By Using The ICONA Model: A Case Study Of Ayvalı Dam Watershed, *Turkish Journal of Forest Science*, vol. 6, no. 2, pp. 510-538, 2022. <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.1167356>.
- [26] K. Alparslan, Kaman Deresi Havzasının (Pütürge/Malatya) Erozyon Duyarlılık Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, 2021.
- [27] O. Gökçe, Malatya Şiro Çayı Alt Havzası Erozyon Riskinin Yenilenmiş Evrensel Toprak Kaybı Eşitliği (YETKE) ile Tespit Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, 2019.
- [28] S. Karadoğan, Kuruluş Yeri Açısından Malatya ve Yakın Çevresinin Jeomorfolojisi, *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 27-56, 2001.
- [29] O. Demir, Malatya-İsmetpaşa-Akçadağ-Kürecik-Hekimhan-Arguvan-Karakaya Baraj Gölü Arasındaki Alanın Jeolojisi ve Hidrokarbon Olanakları (Akçadağ Fayı Malatya-Karakaya Gölü Arası), TPAO Arama Grubu, Ankara, 31s. (Yayımlanmamış), 1997.
- [30] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, İklim ve Bitki Örtüsü, Malatya İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, [Online]. Available: <https://malatya.ktb.gov.tr/tr-58266/iklim-ve-bitki-ortusu.html> [Accessed: 18-Nov-2024].
- [31] M. T. Şengün, M. Siler ve F. Engin, Hidrografik ve Jeomorfolojik Analizlerde Coğrafi Bilgi Sistemleri Tekniklerinin Kullanımı: Malatya Havzası Örneği, VIII. Coğrafya Sempozyumu, pp. 23-24, 2014.
- [32] F. Engin and M. T. Şengün, Darendede Ovası ve Yakın Çevresinde (Malatya) Jeomorfolojinin Toprak Üzerine Etkileri, *Uluslararası Jeomorfoloji Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, pp. 491-505, Elâzığ: Fırat Üniversitesi Basımevi, 2017.
- [33] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), 1/500.000 Ölçekli Sivas ve Erzurum Jeoloji Haritaları, Ankara: MTA Yayınları.
- [34] V. Avcı, M. Sunkar ve A. Toprak, Malatya Kuzeydoğusunda Ballı ve Memikan Dereleri Arasındaki Sahanın Erozyon Duyarlılık Analizi, *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 10, no. 27, pp. 491-505, 2017. <https://doi.org/10.14520/adyusbd.329256>.
- [35] K. Herweg, Assessment of Current Erosion Damage: Field Manual. Soil Conservation Research Programme, Ethiopia, and Centre for Development and Environment, University of Berne, Switzerland, 1996.





The effect of air-cooling heat treatment on the microstructure and phase transformations of structural steels

Yapı çeliklerinin mikroyapısı ve faz dönüşümleri üzerine hava soğutmalı ısıtma işleminin etkisi

Semih Mahmut Aktarer^{1,*} 

¹ Recep Tayyip Erdoğan University, Department of Automotive Technology, 53020, Rize, Türkiye

Abstract

The aim of this study was to investigate the microstructure, phase transformations, and hardness changes of S235JR, S275JR, and S355JR structural steels after air-cooled heat treatment. The steel samples were austenitized at 1000°C and then cooled in air, and the sample temperatures were recorded with a thermocouple during cooling. The microstructure and phase transformations of the samples were analyzed both experimentally and with the Computerized Combining Phase Diagrams and Thermochemistry (CALPHAD) material property software. It was observed that higher carbon and manganese levels in structural steels lower the phase transformation temperatures, promote bainite formation, reduce the average ferrite grain size, and consequently lead to an increase in hardness. The phase ratios and hardness values were determined by the predicted experimental results with a deviation of less than 3%. These results show that a balanced ferrite and bainite phase distribution is achieved air cooling and the software effectively models these transformations.

Keywords: Structural steels, Air cooling, Microstructure, Phase transformation, CALPHAD

1 Introduction

Structural steel is widely preferred in many industries, especially in construction and machinery, thanks to their high strength, good weldability, formability and cost-effectiveness [1]. Especially in the automotive industry, their use in chassis parts, body panels and other structural components stands out [2]. The preference of these steels in the automotive sector increases the durability of vehicles, while at the same time contributing to fuel efficiency by optimizing weight [1]. Structural steels are classified as carbon-manganese steels and their microstructure, which can be modified by heat treatment, allows mechanical properties to be easily improved [3]. Numerous studies have been carried out to improve the performance and environmental resistance of structural steels. Solomon et al. [4] investigated the synergistic effects of additives such as poly in mitigating chloride-induced dissolution in S235JR steel, thereby contributing to corrosion protection. Similarly, Krella et al. [5] investigated the cavitation erosion resistance of S235JR,

Öz

Bu çalışmanın amacı, S235JR, S275JR ve S355JR yapısal çeliklerinin hava soğutmalı ısıtma işlem sonrası mikro yapısını, faz dönüşümlerini ve sertlik değişimini incelemektir. Çelik numuneleri, 1000°C'de östenitleştirdikten sonra havada soğutulmuş ve soğuma esnasında numune sıcaklıkları bir termokupl ile kaydedilmiştir. Numunelerin mikro yapı incelemeleri ile faz dönüşümleri hem deneysel yöntemlerle hem de Faz Diyagramlarının ve Termokimyanın Bilgisayarla Birleştirilmesi (CALPHAD) malzeme özelliği yazılımıyla analiz edilmiştir. Yapı çeliklerinde artan karbon ve mangan içeriği faz dönüşüm sıcaklıklarını düşürerek beyrit oluşumunu arttırdığı, ferrit ortalama tane boyutunu küçülttüğü ve bu yüzden de sertlik değerlerinde artışa yol açtığı görülmüştür. Yazılım ile belirlenen faz oranları ve sertlik değerleri, deneysel sonuçları %3'ten düşük bir sapma ile tahmin etmiştir. Bu sonuçlar, hava soğutma ile dengeli bir ferrit ve beyrit faz dağılımının elde edildiğini ve malzeme özellik yazılımının bu faz dönüşümlerini başarılı bir şekilde modelleyebildiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yapısal çelikler; Havada soğutma, Mikroyapı, Faz dönüşümü, CALPHAD

shedding light on its durability under dynamic fluid conditions. Mechanical properties were a key focus. Irsel [6] analysed microstructural and mechanical relationships in S235JR steel using different welding techniques, while Gamerding et al. [7] investigated tensile strength in laser-welded seams, demonstrating the benefits of advanced welding technologies. Fatigue performance and fracture mechanisms have also been extensively investigated. Neimitz and Galkiewicz [8] conducted experimental and numerical analyses of fracture mechanisms in S355JR steel, while Torić et al. [9] developed a high-temperature material model for S275JR steel, advancing knowledge of extreme state behaviour. Efforts to improve corrosion resistance are noteworthy. Chen et al. [10] investigated residual stresses in welded joints between S355JR and stainless steel, while Yongzhong et al. [11] improved the corrosion resistance of S275JR using amorphous AlCrNi coatings. Collectively, these studies highlight significant advances in structural steel research, particularly in corrosion resistance, mechanical

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: semih.aktarer@erdogan.edu.tr (S. M. Aktarer)
Geliş / Recieved: 04.11.2024 Kabul / Accepted: 29.12.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1578719

properties and durability under different loading conditions. These research advancements not only contribute to improved processing and alloy design strategies but also emphasize the critical role of microstructural control in structural steels. This plays a critical role in meeting the safety and performance requirements of the construction, machinery and automotive industries. The martensitic microstructure of structural steels after rapid cooling results in high hardness but low ductility, which is undesirable in terms of strength-toughness balance [12]. Overly hard structures can negatively impact mechanical performance by raising the likelihood of brittle fractures in applications [13]. Therefore, controlled slow cooling enables the gradual development of phases such as ferrite, bainite, and pearlite, promoting a well-balanced microstructure [14]. Bainitic microstructures provide an optimal combination of strength and toughness, especially for large components where consistent rapid cooling is unfeasible. These microstructural attributes are widely utilized in sectors such as defense, nuclear, and automotive industries [14]. Recent research has explored how slow cooling rates and various heat treatment techniques influence the microstructure and strength of steels, aiming to enhance their mechanical properties. Chakraborty et al. [14] highlighted the potential for producing carbide-free bainitic steel by showing that slow cooling rates can promote bainitic microstructure formation in low-carbon steels. Ding et al. [15] found that slow cooling rates in Q420 and Q690 steels significantly reduced strength but enhanced ductility. Di Martino and Thewlis [16] investigated the transformation characteristics of ferrite/carbide aggregates (FCA) in low-carbon manganese steels, showing that this structure forms at rates similar to those of Widmanstätten ferrite. These studies collectively demonstrate how microstructural transformations and heat treatment parameters influence steel properties. Thakur and Aregawi [17] examined the potential for improving the mechanical properties of ST 37-2 steel by heat treatments and found that treatments such as quenching and tempering increase strength and hardness, while annealing increases ductility. Fadare et al. [2] emphasized that NST 37-2 steel can be optimized by heat treatments and especially hardening provides high strength and hardness. Finally, Dobrzański and Honysz [13] stated that air cooling is an effective method to obtain stable mechanical properties, but gives lower results in terms of hardness compared to quenching.

The research above shows how different heat treatments influence both the microstructure and the mechanical characteristics of steel. Forming ferritic and bainitic structures is an important approach to optimizing strength and ductility, especially in low-carbon steels. Although much research has been done on the rapid cooling of steels (e.g. quenching), there is a need for studies on the effects of air cooling on phase transformations and mechanical properties. Cooling at slow and moderate rates aids in forming ferritic and bainitic structures in steels, leading to optimal strength and ductility, reducing internal stresses, eliminating the need for additional heat treatment, and lowering energy costs. Consequently, further studies are

required to examine the effects of air cooling on microstructure and mechanical characteristics, particularly in low-carbon steels. In this study, the microstructural attributes, phase transformations, and hardness levels of S235JR, S275JR, and S355JR structural steels subjected to air cooling were analyzed and compared with computational material modeling software results.

2 Experimental procedure

The chemical compositions of the structural steels investigated in the current study are presented in Table 1. Specimens with dimensions of $25 \times 25 \times 3$ mm were prepared from commercially available plates. These specimens were kept in a box-type resistance furnace at 1000 °C for 30 minutes and then cooled in air. To ensure the complete austenitization of the steel sample of this size and to achieve a homogeneous initial microstructure, the existing heat treatment parameters have been determined from the literature [2,13,16]. The temperature of the samples during cooling in air was recorded using a K-type thermocouple. The cooling rate was calculated from temperature data between 800°C-500°C, the range in which critical phase transformations can be observed in steel before martensite formation [16,18]. The specimens were first sanded step by step with sandpaper from 400 grit to 1500 grit and then polished with a 1 µm diamond suspension. In order to reveal the microstructural details, the specimens were etched with 2% Nital (2 ml HNO₃ + 98 ml C₂H₆O) solution for 15 seconds. Microstructure images of the specimens were examined with an optical microscope and quantitative microstructure measurements were performed using ImageJ software. Phase fractions were determined by histogram thresholding method and grain size properties were determined based on linear intercept method. JMatPro, a Java-based commercial software was used to calculate Time-Temperature Austenitization (TTA), Time-Temperature Transformation (TTT), and Continuous Cooling Transformation (CCT) diagrams. JMatPro models ferrite, pearlite, and bainite transformations in steels, closely following the principles of the Kirkaldy model [19,20]. Hardness was measured using a Vickers microhardness tester, applying a 300 g load for a duration of 10 seconds.

Table 1. Shows the given chemical composition of structural steels used in the current study

Samples	Chemical composition (wt.%)							Fe
	C	Mn	P	S	Si	Cu	N	
S235JR	0.10	0.61	0.023	0.022	0.18	0.24	0.012	Balance
S275JR	0.16	0.78	0.025	0.017	0.20	0.31	0.012	Balance
S355JR	0.21	1.12	0.030	0.030	0.24	0.45	0.012	Balance

3 Results and discussion

The optical microstructures, phase fractions and grain size distribution graphs of the structural steels used in this study are presented in Figure 1. In optical microscope images, ferrite appears gray, and pearlite appears black. In the phase maps, ferrite is highlighted in gray and pearlite in red after thresholding. S235JR steel shows an equiaxed

ferritic microstructure with relatively small pearlite islands distributed throughout the ferrite matrix (Figure 1(a)-(a1)). The pearlite phase fraction in this steel was 12% (Figure 1(a2)) and the average grain size of ferrite was measured to be approximately 7.92 μm (Figure 1(a3)). In S275JR steel, the average grain size of ferrite was 7.88 μm and the pearlite phase fraction was 22% (Figure 1(b)-(b3)). S355JR steel has an average ferrite grain size of 9.05 μm and exhibits a banded microstructure with a pearlite fraction of 30% (Figure 1(c)-(c3)). The microhardness values of S235JR, S275JR and S355JR steels were 140 HV_{0.3}, 165 HV_{0.3} and 185 HV_{0.3} respectively. The hardness of structural steels increases with increasing pearlite fraction. There is no significant difference between the average grain sizes of S235JR and S275JR, which are slightly smaller than those of S355JR. Therefore, the grain size effect on the hardness of the three structural steels is quite low compared to the pearlite phase fraction.

Figure 2 shows the temperature dependent phase transformations of ferrite, pearlite and austenite in S235JR, S275JR and S355JR structural steels. The phase fractions at room temperature were calculated as 86.2% ferrite and 13.8% pearlite for S235JR, 78.4% ferrite and 21.6% pearlite for S275JR and 71.9% ferrite and 28.1% pearlite for S355JR. These values, derived using JMatPro software, deviate by no more than 2% from the experimentally observed phase distributions presented in Figure 1.

TTA diagrams presented in Figure 3 compare the austenitization behavior of S235JR, S275JR and S355JR steels at different heating rates. In the diagrams, it is seen that the austenite starts temperature (A_1), austenite end temperature (A_3) and homogenization temperatures of the austenite phase vary according to the steel types. An upward trend was observed in these temperatures with an increasing heating rate. For S235JR, S275JR and S355JR steels, A_1 temperatures were 709°C, 709°C and 705°C; A_3 temperatures were 858°C, 833°C and 810°C; and homogenization temperatures of austenite were 887°C, 870°C and 858°C at 1°C/s heating rate, respectively. Among these, S235JR steel exhibits higher A_1 and A_3 temperatures than the other structural steels, due to its lower carbon and manganese content. Although the A_1 temperature of S275JR remains constant, its A_3 temperature is lower. S355JR steel, with a higher carbon and manganese content, has lower. Figure 4 presents TTT diagrams calculated using JMatPro software for structural steels S235JR, S275JR and S355JR. These diagrams provide important information about the isothermal phase transformation behavior of steels and reveal how this behavior is influenced by the chemical composition of the steels concerned. The ferrite transformation temperature of 235JR, S275JR and S355JR

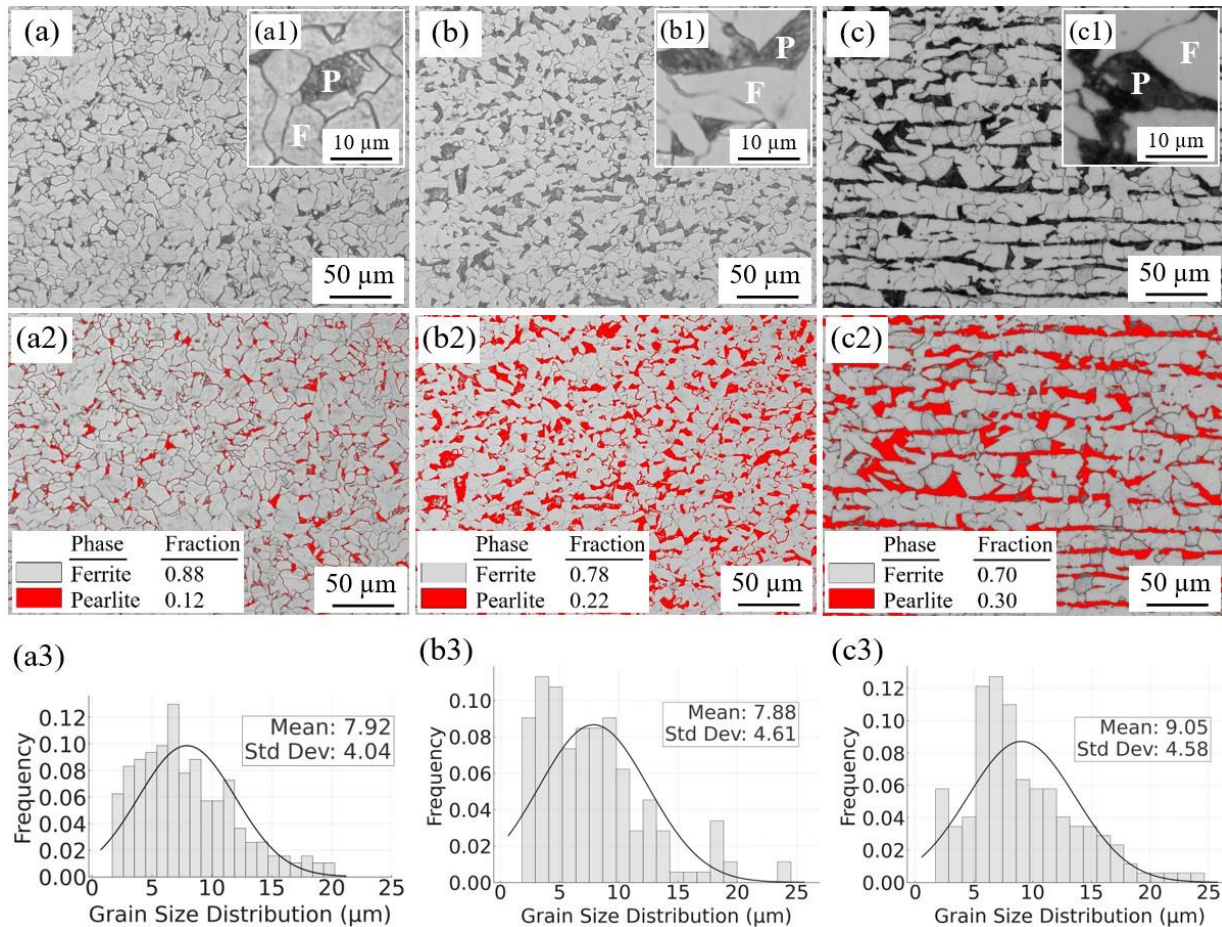


Figure 1. Optical microscope images, phase maps, and grain size distributions of the initial microstructures of (a)-(a3) S235JR, (b)-(b3) S275JR, and (c)-(c3) S355JR

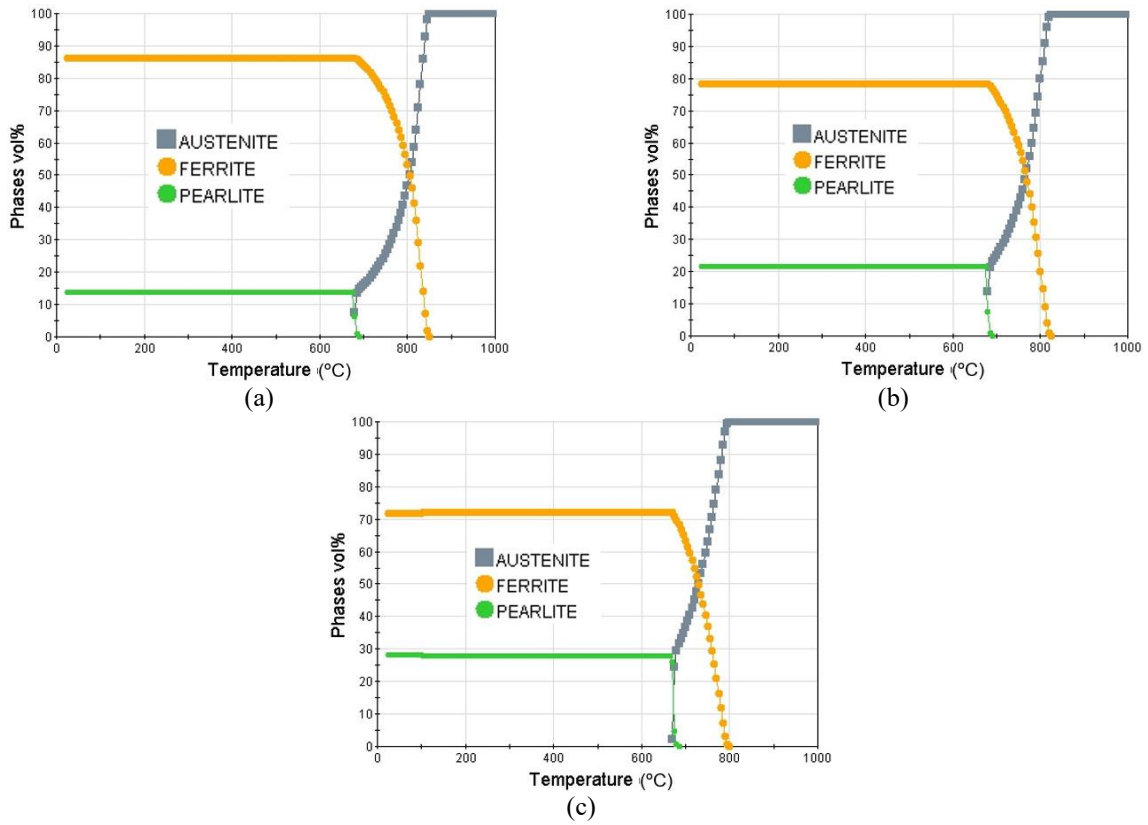


Figure 2. The phase fractions of the initial microstructure were calculated using JMatPro software based on the chemical composition for (a) S235JR, (b) S275JR, and (c) S355JR

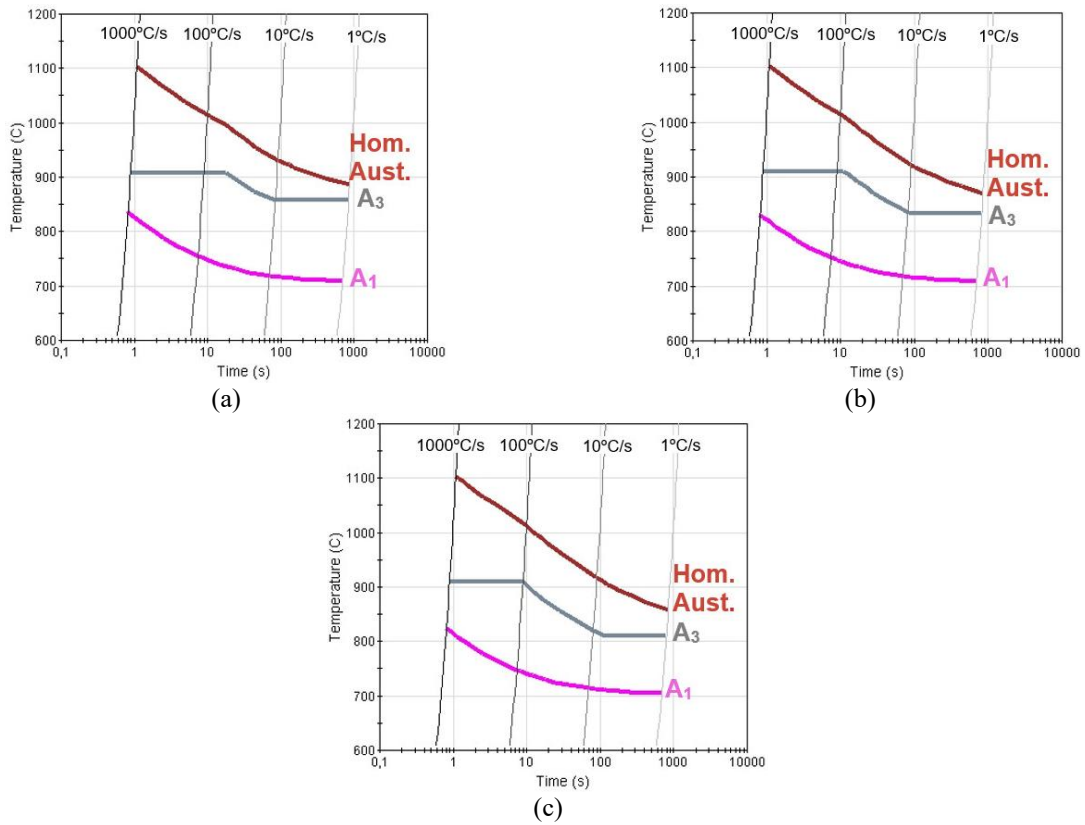


Figure 3. TTA diagram was calculated using JMatPro software for (a) S235JR, (b) S275JR, and (c) S355JR

steels were 858.4°C, 833.3°C and 810.3°C respectively. This decrease in the transformation temperature is due to the increase in the ratio of carbon and alloying elements. The austenite phase is more stable with increasing carbon content, which delays ferrite transformation [21]. Carbon atoms interfere with the nucleation and growth processes of the ferrite phase, making diffusion difficult, which reduces the transformation temperature [21]. Due to the increasing carbon content, the martensitic transformation starts (Ms), and end (Mf) temperatures of structural steels also decrease. The martensitic transformation starting temperatures of S235JR, S275JR and S355JR were calculated as 469.9°C, 438.7°C and 404.8°C, respectively. This is a known behavior that the amount of carbon in the composition of steels makes austenite more stable and thus reduces the martensite starting temperature [21]. Increasing the carbon content slows down the kinetics of martensite transformation, causing transformation to start at lower temperatures [21]. The bainite transformation curves shift to the right on the time axis from S235JR to S355JR, indicating that bainite transformation occurs more slowly. This trend clearly shows that bainite transformation takes longer time in steels with higher carbon and alloying elements [14]. Especially in S355JR steel, the later onset of bainite transformation indicates that the bainite nucleation process takes longer due to the increased alloying element content. The slowing of bainite transformation is due to the reduced diffusion of carbon in the austenite phase, which delays the transformation kinetics [14].

These transformations directly affect the microstructure and mechanical properties of steels. For example, the slower formation of bainite in S355JR can increase the hardness and strength of this steel while potentially reducing its ductility. Understanding these transformation behaviors, as shown in TTT diagrams, plays a critical role in optimizing heat treatment processes for structural steels. By controlling cooling rates and transformation temperatures, the microstructure can be adjusted to achieve desired hardness, strength, and toughness properties.

Most heat treatments are related to transformations that occur during continuous cooling [16]. Since TTT diagrams show the time-temperature relationship of austenitic transformation at constant temperature, the curves showing the cooling rate theoretically do not coincide with the curves in the TTT diagram. In addition, it is known that with the effect of continuous cooling, the nose of the transformation curves in the CCT diagram shifts down and to the right according to the position of the isothermal transformation curves [19]. Hence, it is more accurate to use the CCT diagram in the investigation of phase transformations with cooling rate. Therefore, the temperature values recorded during the cooling of the samples (experimental cooling rate) can be applied to the continuous cooling transformation diagrams created with the JMatPro software to examine possible microstructural features. Figure 5 is the continuous cooling transformation diagrams of structural steels austenitized at 1000°C and the experimental cooling rate of these steels is shown by the dashed line. The cooling rates of

S235JR, S275JR and S355JR structural steels between 500°C-800°C were 33°C/s, 27°C/s and 26°C/s respectively. It can be seen that the transformation curves in the CCT diagram (Figure 5 (a) to (c)) also shift downward and to the right with the increase in the carbon content in the chemical composition of the structural steels. The cooling curves of all three steels do not intersect the martensitic transformation region and only intersect the ferrite and bainite transformation regions. Therefore, ferrite and bainite phases are expected to form in the microstructure of all three steels. Although S235JR exhibits a slightly higher cooling rate, the austenite-ferrite transformation started at higher temperatures (about 800°C) compared to the other two structural steels. In addition, the experimental cooling curve of S235JR crosses the ferrite transformation zone more. Therefore, more ferrite phases are expected to form in the microstructure of S235JR steel compared to the other two structural steels. With increasing carbon content in the structural steels (from S235JR to S355JR), the region between the ferrite transformation initiation curve and the bainite transformation initiation curve narrows and the distance at which the experimental cooling curves intersect the two transformation curves decreases.

This indicates that the possible ferrite phase fraction from S235JR to S355JR will decrease and the bainite phase fraction will increase. Increasing bainite phase fraction in the microstructure of these steels means that the hardness will increase. As a matter of fact, the experimental hardness of S235JR, S275JR and S355JR were determined as 224HV_{0.3}, 275HV_{0.3} and 345HV_{0.3}, respectively (Table 2). In addition, the estimated hardness values of JMarPro showed great consistency with the experimental hardness values (Figure 5 (a) to (c)).

Table 2. Microhardness values structural steels before and after heat treatment

Structural Steels	Base hardness HV _{0.3}	Heat treatment hardness HV _{0.3}
S235JR	140	224
S275JR	165	275
S355JR	185	345

Figure 6 shows the microstructural details of S235JR, S275JR and S355JR steels after air cooling heat treatment. Optical microscope images of the structural steels show the presence of Primary Ferrite (PF), Ferrite/Carbide Aggregate (FCA), Widmanstätten Ferrite (WF) and Bainite (B) structures (Figure 6(a)-(c)). PF is formed by nucleation of ferrite along pre-existing austenite grains, usually at elevated temperatures, and is observed as equilateral or polygonal grains formed by slower cooling and diffusion-controlled processes [18].

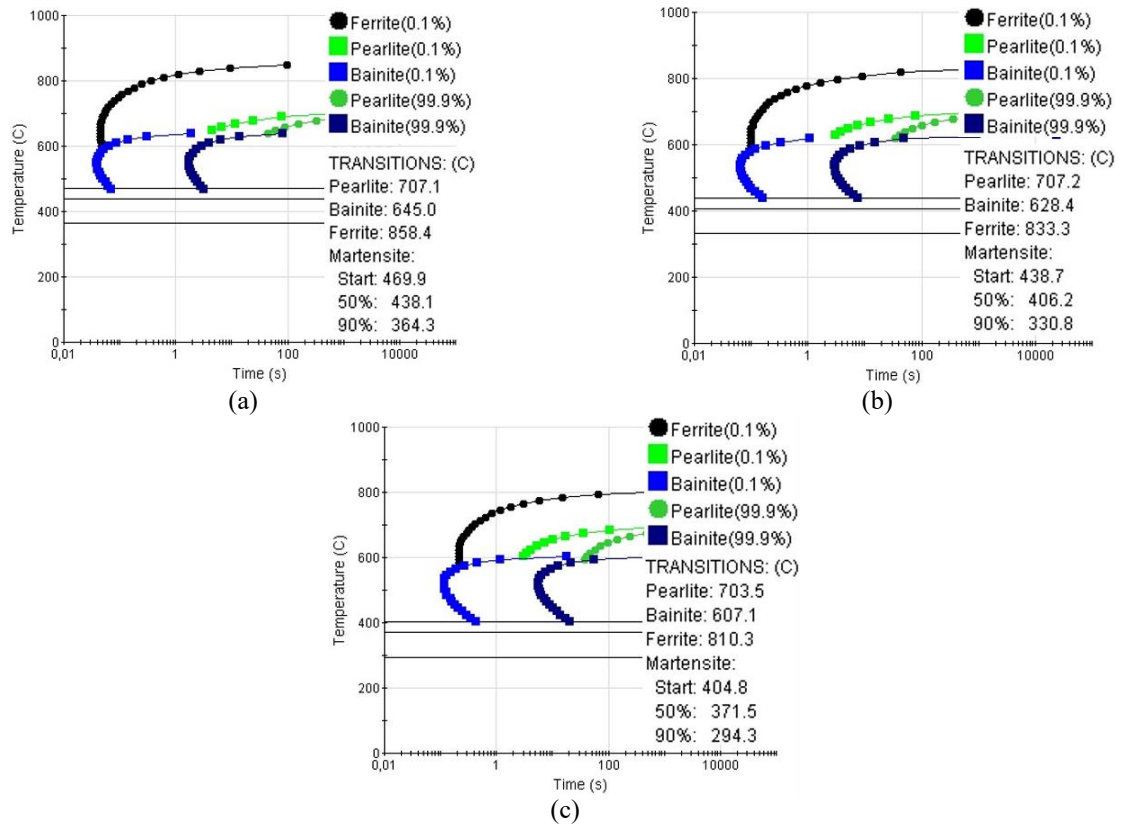


Figure 4. TTT diagram was calculated using JMatPro software for (a) S235JR, (b) S275JR, and (c) S355JR

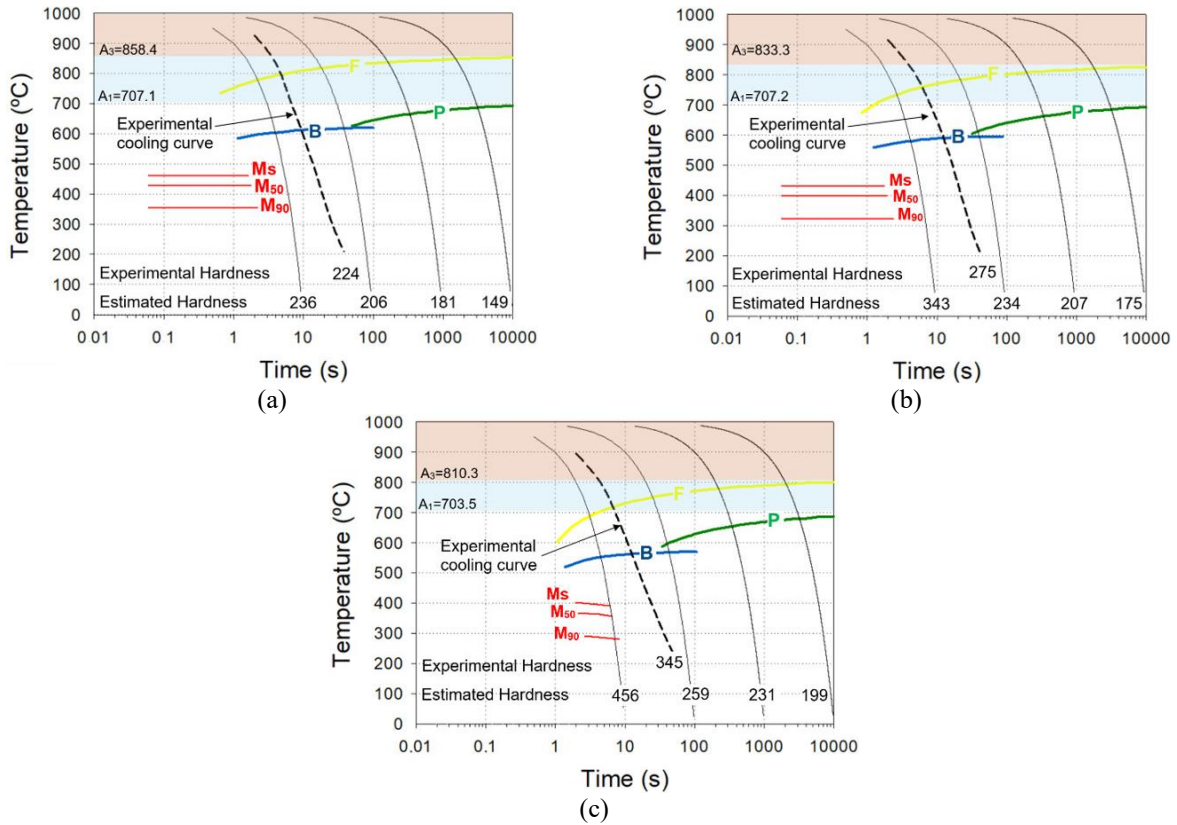


Figure 5. JMatPro predictions of CCT diagram for the present (a) S235JR, (b) S275JR, and (c) S355JR steels austenitized at 1000 °C

FCA is a unique microstructure that occurs in low carbon manganese steels under continuous cooling conditions between pearlite and bainite formation temperatures; unlike pearlite or bainite, it consists of a smooth ferrite matrix containing finely dispersed cementite particles [16]. WF nucleates at a lower subcooling temperature and grows as thin, elongated plates extending from austenite grain boundaries or inclusions and has high aspect ratios and appears in a colony structure of parallel plates [18].

Bainite forms by a displacive transformation at lower temperatures and grows as individual plates or slopes; in upper bainite carbides are deposited between ferrite plates, while in lower bainite they are precipitated both within and between ferrite plates [14]. These microstructures are formed under different temperatures and cooling conditions and are distinguished from each other by their transformation mechanisms and morphology. From S235JR to S355JR, the PF structure in the microstructure of the structural steels decreases and the WF plates become thinner (Figure 6(a2) - (c2)). From S235JR to S275JR, the WF and FCA structure

increases (Figure 6(a2) -(b2)). From S275JR to S355JR, B structure increases while WF decreases (Figure 6(b2) -(c2)). While WF and PF structures can be directly distinguished as ferrite phase by thresholding, B and FCA are very difficult to distinguish. Therefore, these two phases are referred to as “others” in Figure 6(a2) -(c2). Figure 6 (a2) to (c2) shows that the fraction of ferrite phase decreases and the fraction of FCA and B increases. These experimentally observed microstructural features are in agreement with the transformation characteristics in the CCT diagrams given in Figure 5. The PF and WF fraction of 52% in structural steel (0.17%C, 0.52%Mn), cooled from 1100°C at a cooling rate of 25°C/s as reported by Martino et al. [22], is consistent with the PF and WF fraction of 49% at a cooling rate of 33°C/s observed in S235JR steel in the present study (Figure 6(a2)). The PF and WF fraction of 36% in S275JR steel cooled at a rate of 27°C/s is comparable to the PF and WF fraction of 43% at a 25°C/s cooling rate in another structural steel (0.17%C, 1.86%Mn) [22]. In the microstructure of S355JR steel, 30% PF and WF were detected (Figure 6 (a2)).

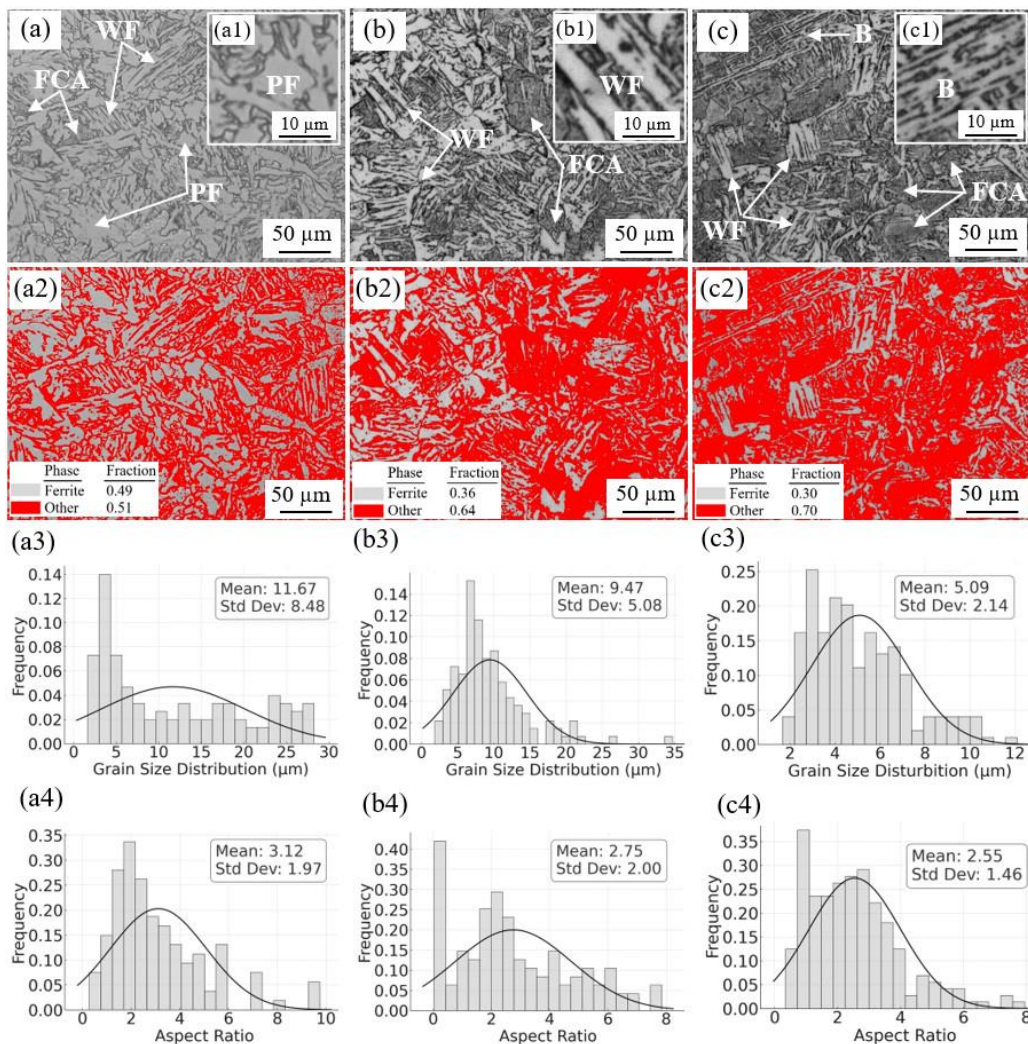


Figure 6. Optical microscope images, phase maps, grain size distributions, and aspect ratios of the microstructures of (a)-(a4) S235JR, (b)-(b4) S275JR, and (c)-(c4) S355JR following heat treatment (PF: Primary Ferrite, FCA: Ferrite/Carbide Aggregate, WF: Widmanstätten Ferrite, B: Bainite)

This indicates that the increased C and Mn content leads to the formation of more B and FCA in the microstructure. The average ferrite grain size of S235JR steel was 11.67 μm and aspect ratio was 3.12 (Figure 6(a3) and (a4)); the average ferrite grain size of S275JR steel was 9.47 μm and aspect ratio was 2.75 (Figure 6(b3) and (b4)); the average ferrite grain size of S355JR steel was 5.09 μm and aspect ratio was 2.55 (Figure 6(c3) and (c4)). Figure 7 illustrates the effect of heat treatment on the grain size of structural steels. Increasing C and Mn content in steels delays the transformation of the austenite phase to ferrite, resulting in the formation of more nucleation points, which reduces the size and aspect ratio of ferrite grains [23]. Carbon lowers the transformation temperature and promotes the formation of finer ferrite grains, while manganese stabilizes the austenite phase, increasing the nucleation rate and limiting dislocation movement [24,25].

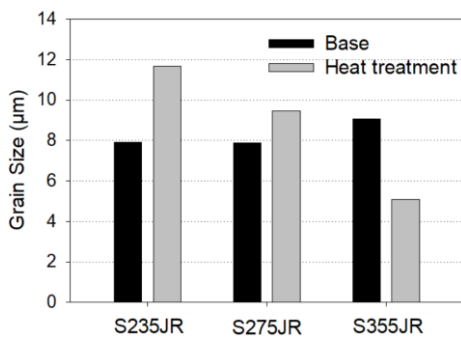


Figure 7. Grain size graph of structural steels before and after heat treatment

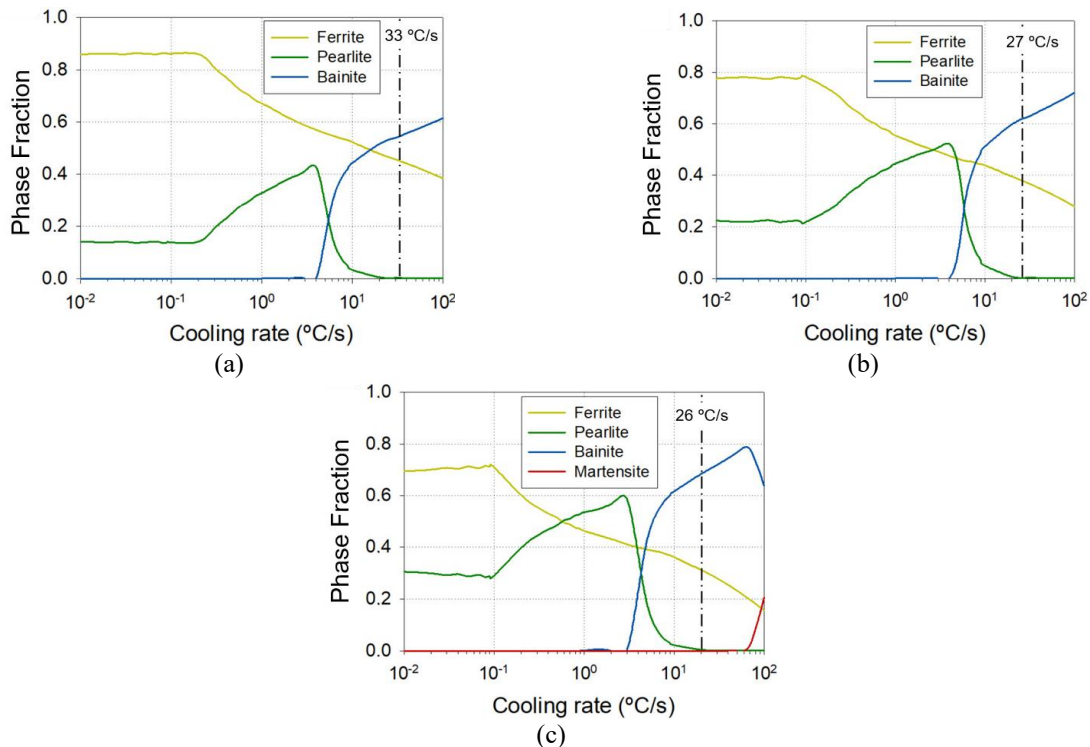


Figure 8. JMatPro simulations illustrate the changes in phase fractions of (a) S235JR, (b) S275JR, and (c) S355JR based on cooling rates from the austenitization at 1000°C

Furthermore, an increased proportion of these elements forms carbide precipitates in the ferrite phase and accumulates at grain boundaries, physically limiting the growth of grains [26]. The combination of these effects explains the formation of a finer grained and decreasing aspect ratio structure in the ferrite phase from S235JR to S355JR. In addition, the increase in bainite content and reduction in ferrite grain size in the microstructure of these structural steels following heat treatment contribute to the observed hardness increase.

JMatPro predictions of the phases that will form in the microstructure of structural steels according to cooling rates are given in Figure 8. The experimental cooling rates of these steels are shown with a dashed line in the phase fraction-cooling rate graph. According to these graphs, approximately 46% ferrite and 0.54 bainite (Figure 8(a)) in the microstructure of S235JR steel, approximately 38% ferrite and 0.62 bainite (Figure 8(b)) in the microstructure of S275JR steel, approximately 30% ferrite and 0.70 bainite (Figure 8(c)) in the microstructure of S355JR steel. The estimated perlite fraction is neglected because it is too low (0.001%-0.004%). Also, no pearlite was observed in the microstructure examinations. The prediction of the phase fractions in Figure 8 showed high consistency with the phase fractions determined from the microstructure investigations (Figure 6(a2) -(c2)) with a maximum deviation of 3%. These findings show that JMatPro predictions are in agreement with the experimental results and can reliably predict the microstructure phase fractions of structural steels due to cooling rates.

4 Conclusions

In this study, the phases, phase fractions, and hardness values of S235JR, S275JR, and S355JR structural steels after air-cooling heat treatment were analyzed using both experimental methods and material property simulation software. The principal findings are presented below.

1. An increase in the carbon and manganese content of structural steels results in a progressive reduction in transformation temperatures, which can be attributed to the enhanced stability of the austenite phase.
2. The presence of higher carbon and manganese fractions results in a downward and rightward shift of the ferrite and austenite transformation curves, thereby causing transformations to occur at lower temperatures over longer periods. This shift results in a reduction in ferrite grain size, an increase in the bainite phase fraction, and a consequent rise in hardness.
3. The microstructure of the structural steels was validated through experimental observations, as predicted by the intersection of the ferrite and bainite regions in the CCT (Continuous Cooling Transformation) diagrams of the experimental cooling curves. Furthermore, the hardness values predicted by the CCT diagrams were found to be in agreement with the experimentally measured values.
4. The experimental results revealed deviations of less than 3% between the phase fractions predicted by JMatPro software and those determined via microstructural analysis. This confirms the software's reliability in accurately predicting the effects of cooling rates on steel microstructures under slow cooling conditions.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 16 %

References

- [1] Y. Li, M. Wang, G. Li and B. Jiang, Mechanical properties of hot-rolled structural steels at elevated Temperatures: A review. *Fire Safety Journal*, 119, 1-23, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103237>.
- [2] D.A. Fadare, T.G. Fadara and O.Y. Akanbi, Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 10 299–308, 2011. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.103020>.
- [3] B. Sun, A.K. da Silva, Y. Wu, Y. Ma, H. Chen, C. Scott, D. Ponge and D. Raabe, Physical metallurgy of medium-Mn advanced high-strength steels. *International Materials Reviews*. 68, 786–824, 2023. <https://doi.org/10.1080/09506608.2022.2153220>.
- [4] M.M. Solomon, S.A. Umoren, A. Gilda Ritacca, I. Ritacco, D. Hu and L. Guo, Tailoring poly (2-ethyl-2-oxazoline) towards effective mitigation of chloride-induced dissolution of S235JR steel: The synergistic contributions of potassium iodide and myristyl trimethylammonium bromide. *Journal of Molecular Liquids*, 396, 1–21, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123935>.
- [5] A.K. Krella, D.E. Zakrzewska and A. Marchewicz, The resistance of S235JR steel to cavitation erosion. *Wear*, 452–453, 1–14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203295>.
- [6] G. İrsel, Study of the microstructure and mechanical property relationships of shielded metal arc and TIG welded S235JR steel joints. *Materials Science and Engineering: A*, 830, 1–14, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142320>.
- [7] M. Gamerdinger, F. Akyel, S. Olschok and U. Reisgen, Investigating mechanical properties of laser beam weld seams with LTT-effect in 1.4307 and S235JR by tensile test and DIC. *Procedia CIRP*, 111- 420–424, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.179>.
- [8] A. Neimitz and J. Galkiewicz, The experimental-numerical analyses of the failure mechanisms of S355JR steel, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 108, 1–14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102666>.
- [9] N. Torić, J. Brnić, I. Boko, M. Brčić, I.W. Burgess and I.U. Glavinić, Development of a high temperature material model for grade s275jr steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 161–168, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.020>.
- [10] Q. Chen, J. Yang, X. Liu, J. Tang and B. Huang, Effect of the groove type when considering a thermometallurgical-mechanical model of the welding residual stress and deformation in an S355JR-316L dissimilar welded joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 290–303, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.011>.
- [11] W. Yongzhong and Z. Donghui, Electrochemical corrosion behaviors and microhardness of laser thermal sprayed amorphous AlCrNi coating on S275JR steel. *Optics & Laser Technology Journal*, 118, 115–120, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.05.004>.
- [12] Y. Tomita and K. Okabayashi, Effect of microstructure on strength and toughness of heat-treated low alloy structural steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 17, 1203–1209, 1986. <https://doi.org/10.1007/BF02665319>.
- [13] L.A. Dobrzański and R. Honysz, Heat treatment influence on mechanical properties of structural steels for quenching and tempering. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing*, 55, 461–468, 2012.
- [14] P. Chakraborty, S. Neogy, N.K. Sarkar, H. Donthula, S.K. Ghosh, H.K. Nandi, B. Gopalakrishna, I. Balasundar and R. Tewari, Formation of Bainite in a Low-Carbon Steel at Slow Cooling Rate – Experimental Observations and Thermodynamic Validation. *Steel Research International*, 2400593, 1–12 2024. <https://doi.org/10.1002/srin.202400593>.

- [15] F.X. Ding, L.F. Lan, Y.J. Yu and M.K. Man, Experimental study of the effect of a slow-cooling heat treatment on the mechanical properties of high strength steels. *Construction and Building Materials*, 241, 1–12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118020>.
- [16] S.F. Di Martino and G. Thewlis, Transformation characteristics of ferrite/carbide aggregate in continuously cooled, low carbon-manganese steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45, 579–594, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-2035-x>.
- [17] A. Thakur and G.-E. Aregawi, International Journal of Current Engineering and Technology Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of ST 37-2 Rear Trailing Arm (Case study at MIE). *International Journal of Current Engineering and Technology*, 9, 80–90, 2019. <https://doi.org/10.14741/ijcet/v.9.1.12>.
- [18] G. Thewlis, Classification and quantification of microstructures in steels *Materials Science and Technology*, 20, 143–160, 2004. <https://doi.org/10.1179/026708304225010325>.
- [19] J.S. Kirkaldy and D. Venugopalan, Phase Transformations in Ferrous Alloys. *International Conference on Phase Transformations in Ferrous Alloys*, pp. 125–125, Philadelphia, USA, 1984.
- [20] J.S. Kirkaldy, Diffusion-controlled phase transformations in steels. *Theory and applications*, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 20, 50–61, 1991.
- [21] J. Rezaei, M. Habibi Parsa and H. Mirzadeh, Phase transformation kinetics of high-carbon steel during continuous heating. *The Journal of Materials Research and Technology*, 27, 2524–2537, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.089>.
- [22] S.F. Di Martino and G. Thewlis, Transformation Characteristics of Ferrite/Carbide Aggregate in Continuously Cooled, Low Carbon-Manganese Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45, 579–594, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-2035-x>.
- [23] V.L. de la Concepción, H.N. Lorusso and H.G. Svoboda, Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels. *Procedia Materials Science*, 8, 1047–1056, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.167>.
- [24] A.N. Ashong, M.Y. Na, H.C. Kim, S.H. Noh, T. Park, H.J. Chang and J.H. Kim, Influence of manganese on the microstructure and mechanical properties of oxide-dispersion-strengthened steels. *Materials and Design*, 182, 1–13, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107997>.
- [25] I. Pushkareva, J. Macchi, B. Shalchi-Amirkhiz, F. Fazeli, G. Geandier, F. Danoix, J.D.C. Teixeira, S.Y.P. Allain and C. Scott, A study of the carbon distribution in bainitic ferrite, *Scripta Materialia*, 224, 1–5, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.115140>.
- [26] M. Calcagnotto, D. Ponge and D. Raabe, On the Effect of Manganese on Grain Size Stability and Hardenability in Ultrafine-Grained Ferrite/Martensite Dual-Phase Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43, 37–46, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0828-3>.





Katı oksit yakıt pili cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının çalışma sonrası metalik ara bağlantılardan bertarafı

Removal of solid oxide fuel cell glass-ceramic sealants from metallic interconnectors after operation

Tolga Altan^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde, Türkiye

Öz

Katı oksit yakıt pili (KOYP) sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan cam/cam-seramik malzemelerin diğer alternatif yaklaşımlara göre çok daha etkin bir sızdırmazlık sağladığı bilinmektedir. Öte yandan, KOYP sistemlerinde çalışma sonrası yüzey ile etkili bir yapışma sağlayan cam-seramiklerin metalik akım toplayıcılardan sökülmesi ve ilgili metalik elemanların tekrar kullanılması oldukça zordur. Bu çalışmada cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının farklı konsantrasyonlardaki (hacimce %5, %10, %15, %20 ve %25) nitrik asit çözeltilerinde farklı bekleme süreleri (30-240 dakika) için çözünme davranışı incelenmiştir. Testlerde kullanılan cam-seramiklerin üretiminde şerit döküm yöntemi kullanılmış ve kimyasal işlem öncesi/sonrası yapışma mukavemetleri Crofer malzemeden imal edilen ara bağlantılar kullanarak çekme testi ile belirlenmiştir. Testler sonrasında ara yüzey özellikleri stereoskopik mikroskop ve profilometre analizleri ile incelenmiştir. Belirlenen optimum koşullar altında cam-seramiklerin metal yüzeylerinden tamamen uzaklaştırılabildiği ve çözünme sonrası numune yüzeylerinde kalan oksit tabakaların etkisiyle %70 oranında yapışma mukavemetinde iyileşme sağlayıp sızdırmazlık performansı üzerinde olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Katı oksit yakıt pili, Cam-seramik, Nitrik asit, Yapışma mukavemeti, Geri dönüşüm

1 Giriş

KOYP'ler yüksek çalışma sıcaklıkları (600-1000 °C) gerektiren sistemlerdir. Sistem temel olarak elektrokimyasal reaksiyonların ve elektrik üretiminin gerçekleştiği seramik malzemelerden yapılmış bir anot-elektrolit-katot bileşeni ile gaz dağıtımı ve akım toplama görevi gören metalik ara bağlantılardan oluşmaktadır. Ayrıca, seramik ve metal bileşenleri birleştirmek ve gaz sızdırmaz hale getirmek için ek bir sistem elemanının kullanımı gerekmektedir. Diğer taraftan, uygun olmayan bir sızdırmazlık elemanı kullanımı ise sızıntı nedeniyle yetersiz yakıt beslemesi ve ilgili gazların karışımı sonucu içten yanma gibi sorunlara sebep olup sistem güvenliğini tehlikeye atacaktır. Bu bakımdan

Abstract

Glass/glass-ceramic materials used as solid oxide fuel cell (SOFC) sealing elements are known to provide a much more effective seal than other alternative approaches. On the other hand, it is very difficult to remove glass-ceramics, which provide an effective adhesion with the surfaces after operation in SOFC systems, from metallic current collectors and to reuse the related metallic elements. In this study, the dissolution behavior of glass-ceramic sealing elements in nitric acid solutions of different concentrations (5%, 10%, 15%, 20% and 25% by volume) for different holding times (30-240 minutes) is investigated. Tape casting method is used in the production of glass-ceramics and bonding strengths before/after chemical treatment are determined by tensile tests using Crofer interconnectors. After the tests, the interface properties are examined by stereoscopic microscope and profilometer analyses. It is found that, under the optimum conditions identified, the glass-ceramic can be completely removed from the metal surfaces and that the oxide layers remaining on the sample surfaces after dissolution provide a 70% improvement in bonding strength and have a positive effect on sealing performance.

Keywords: Solid oxide fuel cell, Glass-ceramic, Nitric acid, Bonding strength, Recycling

sızdırmazlık elemanı, anot ve katot taraflarına beslenen gazların karışmasını önlemede ve hücre performansının sürdürülebilmesinde kritik öneme sahiptir. İdeal bir KOYP sızdırmazlık elemanının istenen özellikleri ise kimyasal ve mekanik kararlılık, elektriksel yalıtıcılık, diğer hücre bileşenleri ile uyumluluk, maliyet etkinliği ve tasarım esnekliğidir [1-4]. Öte yandan, yüksek çalışma sıcaklığı, kullanılacak uygun sızdırmazlık malzemelerinin seçimini kısıtlamaktadır.

Literatürde KOYP sızdırmazlığı için metalik (lehim alaşımları, gümüş vb.), sıkıştırılabilir (mika/mika kompozitler) ve rijit contalar (cam, cam-seramik, cam-kompozitler) dâhil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar önerilmiş olup çalışmalar ağırlıklı olarak mika bazlı kompozitler ve cam/cam-seramik

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tolgaaltan@ohu.edu.tr (T. Altan)

Geliş / Received: 11.12.2024 Kabul / Accepted: 05.01.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1599444

malzemeler üzerine odaklanmıştır. Mika ve türevleri, kendine özgü gözenekli yapısı ile yüksek gaz sızıntı oranları sergileme eğilimi ve hücre çalışması sırasında sürekli harici sıkıştırma gerekliliği gibi bir dizi sorunlu özelliğe sahiptir [1,2]. Diğer taraftan camsı geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı ve yumuşama noktası gibi özellikleri ayarlanmış ve hücre çalışma sıcaklığı ile uyum içerisinde olan cam/cam-seramik malzemeler KOYP bileşenleri ile kolayca mekanik/kimyasal yapışma/bağlanma sağlayıp harici bir yük uygulanmasını gerektirmemektedir. Cam esaslı contalar, prensip olarak ideal bir sızdırmazlık gereksinimlerinin çoğunu karşıladığı için KOYP sızdırmazlığı için en etkili yaklaşım olarak kabul edilmektedir [4,5]. Cam/cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının yapısal özellikleri, farklı içeriklere sahip türleri, diğer yaklaşımlarla karşılaştırılması da dâhil birçok farklı açıdan incelendiği derleme makaleler literatürde bulunmaktadır [2,5,6].

Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan cam/cam-seramik malzemelerin içeriği temel olarak cam ağ yapıcı (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 vb.), ağ düzenleyici (Na_2O , CaO , MgO , BaO , vb.) ve ara oksit (Al_2O_3 , TiO_2 , La_2O_3 vb.) malzemelerden oluşmakta olup istenilen nihai özelliklere göre ilgili bileşenler farklı oranlarda kullanılabilir [5]. Ayrıca literatürde cam-seramiklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla içeriğine farklı katkı maddelerinin eklenmesine dayanan çalışmalar yaygın olarak yapılmaktadır. Bu amaçla cam-seramik içeriğine gümüş ve altın nanopartikül [7,8], itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit (YSZ) [9], nikel oksit (NiO) [10], mika [11] ve alüminyum nitrür (AlN) [12] gibi katkı maddeleri eklenmesinin etkileri incelenmiştir. Cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının yapışma/kırılma mukavemeti gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ise üç/dört nokta eğme [13,14], burulma [14,15] ve çekme testi [16,17] gibi yöntemler kullanılmaktadır. Dahası iki metalik çekme plakası arasına yerleştirilen cam-seramik elemanların yüksek sıcaklıklarda fırınlanması sonrası gerçekleştirilen çekme testleri ile birlikte tekli yığın sızıntı testleri sonucunda cam-seramik sızdırmazlık performansının doğrudan yapışma mukavemeti ile ilişkili olduğu deneysel olarak ortaya konmuştur [18]. KOYP sistemi için kullanıma hazır cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının üretiminde ise genellikle basit, ekonomik ve seramik malzemelerin üretiminde yaygın kullanıma sahip şerit döküm yöntemi kullanılmaktadır [19].

Uzun çalışma süreleri dikkate alınarak tasarlanan ticari KOYP sistemlerinde mika ve benzeri sızdırmazlık elemanlarına kıyasla cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının tercih edildiği bilinmektedir [20]. Laboratuvar ölçekli tekli KOYP yığın testlerinde ise metalik ara plakalara yapışma göstermeyen ve test sonrası kolaylıkla test düzeneğinden ayrılabilmesi ile kullanım kolaylığı sunan mika sızdırmazlık elemanlarının olumsuz özellikleri pahasına kullanılması daha olasıdır. Aksine cam-seramik sızdırmazlık elemanı tercih edilmesi ve her seferinde aynı test düzeneğinin yeniden kullanıldığı bir durumda işlem sonrası metalik ara plakalar ile yapışma gösteren cam-seramiklerin yüzeylerden temizlenmesi zorluğu söz konusu olacaktır. Test sonrası cam-seramik malzemelerin

metalik yüzeylerden kaldırılması için akla gelen ilk seçenek taşlama yöntemlerinin kullanılması olsa da bu işlemler sonrası metalik yüzeyler deforme olmakta ve temasın sağlandığı düz yüzeylerin bozulması sonrası ara bağlantıların kullanım dışı kalması gibi sorunlar ile karşılaşmaktadır. Cam-seramiklerin metal ara bağlantı yüzeylerine zarar vermeden uzaklaştırılması malzeme kaybının ve mika kullanımının getirmiş olduğu test sorunlarının önüne geçecektir. Diğer taraftan cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının metalik ara bağlantılardan bertarafı üzerine literatürde bir çalışma tespit edilememiştir.

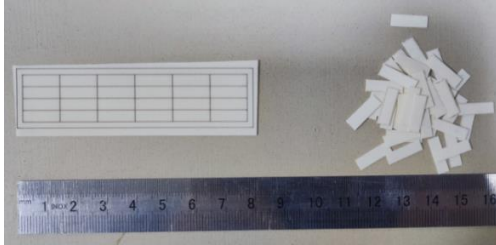
Literatürde silisyum nitrür (Si_3N_4) [21] ve alümina (Al_2O_3) [22] gibi seramik malzemelerin nitrik asit içerisindeki çözünme davranışının ve korozyon direncinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca nitrik asit kullanımının cam yüzeyler üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmaya [23] ek olarak %96 SiO_2 , %3 B_2O_3 , %0.4 R_2O_3 bileşiminden oluşan gözenekli alkali borosilikat camın farklı oran ve sıcaklıklardaki nitrik asitte çözünme davranışı da incelenmiştir [24]. Fakat KOYP cam-seramik sızdırmazlık elemanlarında nitrik asit kullanımı üzerine bir çalışma henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu amaçla, bu çalışmada cam-seramik malzemelerin metalik yüzeylerden tahribatsız olarak uzaklaştırılması amacıyla farklı nitrik asit oranlarına sahip çözeltiler için optimum bekletme süreleri ve ilgili kimyasal işlemin metalik yüzeylere ve yapışma dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İlgili yöntemde nitrik asit kullanımının paslanmaz çelik malzemelerden üretilen metalik ara bağlantılar üzerinde olası olumsuz etkilerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Nitrik asit çoğu metali çözebilen düşük molaritelerde zayıf, konsantre formda ise güçlü bir oksitleyici asittir [25]. Paslanmaz çelikler, kalitelerine ve krom içeriğine göre değişmekle birlikte genel olarak ağırlıkça %20-60 konsantrasyonlardaki nitrik asitte ve düşük sıcaklıklarda korozyona karşı dirençlidir [26]. Dahası nitrik asitler paslanmaz çelik üretiminde kullanılan asitler olup yüzeylerin korozyon direncini arttırmak amacıyla temizlik ve pasivasyon işlemlerinde rol almaktadır [26]. Ancak sıcaklığı artırılmış nitrik asit çözeltilerinin oksitleyici gücü artarak paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyon riski oluşturabilmektedir [26]. Öte yandan krom içeriği arttıkça korozyon oranı düşme eğilimi göstermekte olup yüksek kromlu türler hariç çoğu paslanmaz çelik kaynama sıcaklığında ve %65 nitrik asit çözeltilerinde dahi yılda ortalama 0.13 mm'lik bir korozyon oranı sergilemektedir [27]. Özetle bu çalışmada oda sıcaklığında maksimum %25 konsantrasyonda uygulanan kimyasal işlemin ~%22 krom içeriğine sahip paslanmaz çelik temelli metalik ara bağlantılar üzerinde olumsuz bir etkisinin olması beklenmemektedir.

2 Materyal ve metot

2.1 Cam-seramik sızdırmazlık elemanı üretimi

Cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının üretiminde şerit döküm yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle döküm çamur içeriği hazırlanmış ve polietilen bir şişe içerisine ticari olarak temin edilen cam-seramik tozu (G018-354, Schott, Mainz, Almanya), uygun miktarlarda çözücü (metil etil

keton-etanol karışımı, Sigma-Aldrich, Münih, Almanya), bağlayıcı (butvar, Sigma-Aldrich), dağıtıcı (balık yağı, Sigma-Aldrich) ve plastikleştirici (polietilen glikol, Sigma-Aldrich) eklenmiştir. Karışmayı desteklemek amacıyla içerisinde 5 mm çapında zirkonya bilyelerin de eklendiği şişeler daha sonra 200 rpm dönme hızında bir değirmende 24 saat boyunca karışmaya bırakılmıştır. Ardından, içerisinde politetrafloroetilen kaplamaya sahip karıştırıcı miktatsız bulunan bir cam behere aktarılan içerik, bir miktar çözücüye uzaklaştırmak ve istenilen viskozite değerine ulaşmak amacıyla üç saatlik bir süre boyunca manyetik karıştırmaya tabi tutulmuştur. Gerekli özelliklere ulaşan döküm çamuru daha sonra bıçak aralığı 300 mikron olarak ayarlanmış bir şerit döküm cihazında mylar film üzerine dökülmüştür. Döküm sonrası 30 dakika atmosfere açık bir şekilde kuruyan şeritler uygun uzunluklarda kesilip bir spatula yardımı ile mylar filminden ayrılmıştır. Ayırma sonrası elde edilen tek bir şerit filmin kalınlığı bir mikrometre yardımıyla ~80 µm olarak ölçülmüştür. Daha sonra 8 adet film üst üste yerleştirilmiş ve izostatik pres cihazında 50 MPa basınç altında 3 dakika boyunca lamine edilmiştir. Laminasyon sonrası yapının kalınlığı ~500 µm olarak ölçülmüştür. Son olarak, lamine yapı bir lazer cihazı yardımı ile çekme test numunesi boyutlarında (4.00 * 12.50 mm) kesilmiştir. Şekil 1’de lamine yapının 1 tur uygulanan lazer sonrası görüntüsü ve elde edilen nihai test numunelerine ait görüntü verilmiştir. Ayrıca döküm çamurunun hazırlanmasında kullanılan ve MO(M=Mg,Ca)-Al₂O₃-BaO-SiO₂-B₂O₃ içeriğinden oluşan ticari cam-seramik tozunun üreticisi tarafından bildirilen özellikleri Tablo 1’de verilmiştir [28].



Şekil 1. Cam-seramik sızdırmazlık elemanının lazer kesim esnasında (solda) ve test numunesi boyutlarında (sağda) görünümü

Tablo 1. G018-354 cam-seramik malzeme özellikleri

Özellikler	Değerler
Camsı geçiş sıcaklığı (T _g) [°C]	637
Yumuşama noktası [°C]	711
Önerilen sızdırmazlık sıcaklığı [°C]	850
Termal genleşme katsayısı (20-300 °C) [ppm/K]	9.2
Yoğunluk [g/cm ³]	3.9

2.2 Kimyasal işlem süreci

Hücre çalışma sıcaklıklarında pişirilerek sinterlenmiş ve metalik ara bağlantı yüzeylerine yapışmış cam-seramik malzemelerin yüzeylerden çıkarılması sürecinde kullanılacak nitrik asit saflığının ve bekletme süresinin belirlenmesi için öncelikle sinterlenmiş cam-seramiklerin kimyasal çözünme davranışının tespit edilmesi

gerekmektedir. Bu amaçla sinterlenmiş cam-seramik numunelerin çözünme davranışı hacimce %5, %10, %15, %20 ve %25 konsantrasyon değerlerine sahip nitrik asit çözeltileri içerisinde maruz kalma süresine (30, 60, 120, 180 ve 240 dakika) bağlı olarak incelenmiştir. Tablo 2’de detayları verildiği üzere (100 ml çözelti için), ilgili çözeltiler ticari olarak temin edilen hacimce %56 saflığa ve 1.39 g/cm³ yoğunluğa sahip nitrik asit (KimyaLab, İstanbul, Türkiye) çözeltisinin uygun miktarlarda saf su (18.2 MΩ·cm) ile seyreltilmesiyle hazırlanmıştır. Kişisel koruyucu donanım eşliğinde saf su üzerine asit eklenmesi yoluyla hazırlanan çözeltiler için gerekli miktarların ayarlanmasında ise hassas pipet kullanılmıştır.

Tablo 2. Hazırlanan nitrik asit çözeltileri

Hacimce %	Ağırlıkça %	%56 Nitrik asit (ml)	Saf su (ml)
5	6.8	8.9	91.1
10	13.4	17.9	82.1
15	19.7	26.8	73.2
20	25.8	35.7	64.3
25	31.6	44.6	55.4

Çözünme davranışı incelenecek olan sinterlenmiş cam-seramik numunelerin elde edilmesinde ise harici bir numune hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Eşit ölçülere sahip numunelerin elde edilebilmesi için Şekil 2(a)’da görüldüğü üzere lazer yardımı ile aynı boyutlarda kesilmiş mika plakalar arasına lamine cam-seramik yapılar yerleştirilmiştir. Sinterleme aşamasında yapışma davranışı sergileyen cam-seramiklerin diğer malzemelere kıyasla mika plakalardan daha kolay ayrılabilirdiği tecrübe edildiğinden bu aşamada mika kullanılmıştır. Hazırlanan 8 kat lamine cam-seramik yapının sinterleme sonrası kimyasal çözünme testi için uygun ölçülerde olmadığı tespit edilmiştir. Bu sebepten nihai numunelerin kalınlığını arttırmak amacıyla 24 kat filminden oluşan lamine cam-seramik malzeme kullanılmıştır. Şekil 2(b)’de fırınlama işlemi sonrası sandviç yapının görüntüsü verilmiştir. Mika plakalar sinterlenmiş cam-seramiklerden kolayca ayrılmış ve yüzeyde kalan mika tozları bir zımpara kâğıdı yardımı ile uzaklaştırılmıştır. Nihai sinterlenmiş cam-seramik numunelerin kalınlığı ~600 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 2. Mika plakalar arasına yerleştirilen cam-seramiklerin fırınlama öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri, kimyasal süreç (c)

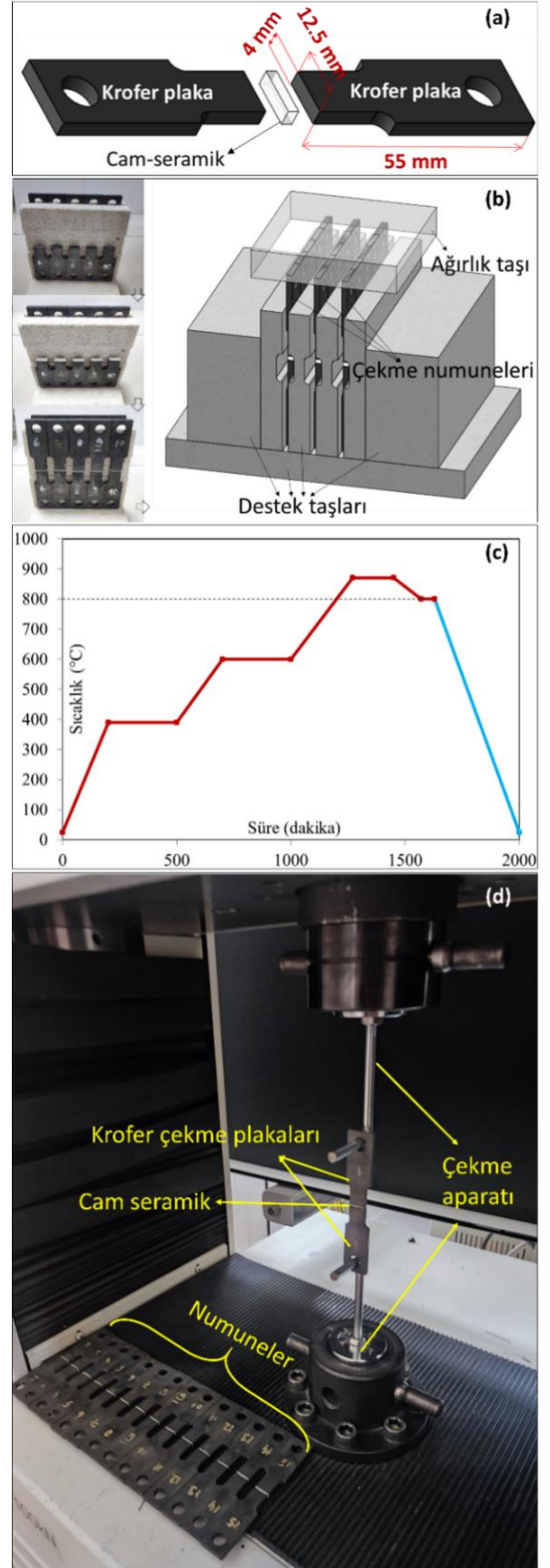
Çözünme deneyi, kütle kaybının hesaplanması yoluyla gerçekleştirilmiş olup numuneler kimyasal işlem öncesi ve sonrasında 0.0001 gram hassasiyete sahip elektronik bir terazi (Isolab Laborgerate GmbH, Eschau, Almanya) ile tartılmıştır. Tartım öncesi tüm numuneler etil alkol ile temizlenmiş ve toz bırakmayan bir fiber temizleme peçetesi ile kurulanmıştır. Belirlenen süreler boyunca çeker ocak içerisine konumlandırılan beherlere ilgilenilen konsantrasyonlarda 10 ml nitrik asit çözeltileri eklenmiştir. Kimyasal süreç sonrası numune yüzeylerindeki çözülmüş/ayrışmış cam-seramik kalıntılarının saf su ile uzaklaştırılması sonrasında geriye kalan yoğun numuneler kurutularak tartılmıştır. Çözünme oranının hesaplanmasında **Denklem (1)** kullanılmış olup ilgili denklemde verilen m_0 ve m_s sırasıyla kimyasal işlem öncesi ve sonrası numune kütlesini ifade etmektedir. Bu haliyle toplamda 25 durum içeren çözünme deneyine ait bir görüntü **Şekil 2(c)**'de verilmiştir.

$$\text{Çözünme oranı (\%)} = \frac{m_0 - m_s}{m_0} * 100 \quad (1)$$

Çözünme deneyi sonrasında belirlenen uygun konsantrasyon ve süre, daha sonra metalik ara bağlantılar arasında fırınlama işlemine tabi tutulan cam-seramiklerin metal yüzeylerden uzaklaştırılması için uygulanmıştır.

2.3 Test ve karakterizasyon

Hücre çalışma koşulları sonrasında metalik yüzeylere bağlanmış olan cam-seramiklerin kimyasal işlem ile uzaklaştırılmasının öncesinde ve sonrasında yüzeylerin yapıları bir stereoskopik mikroskop (Leica EZ4 W, Leica Microsystems, Almanya) ile analiz edilmiştir. Ek olarak cam-seramik malzemelerin metal yüzeylerden uzaklaştırılması sürecinin ilgili yüzeyler üzerindeki etkisi 12.5 µm yarıçaplı iğneye sahip bir profilometre (Bruker Dektak XT stylus profilometer, Kaliforniya, ABD) yardımı ile incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ve iki/üç boyutlu yüzey haritaları 1000 µm*1000 µm ölçülere sahip bir alan için elde edilmiştir. Ayrıca kimyasal süreç sonrası metalik ara bağlantıların yeniden kullanılmak istendiği bir senaryo için kimyasal süreç geçirmiş yüzeylerdeki cam-seramik sızdırmazlık performansının tespit edilmesi de gerekmektedir. Cam-seramik elemanların sızdırmazlık performansının yapışma mukavemetlerinin ölçülmesi yoluyla tespit edilmesi literatürde kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada da iki metalik ara bağlantı arasında yerleştirilen cam-seramiklerin fırınlama sonrası yapışma mukavemetleri çekme testi ile belirlenmiştir. Bu amaçla, çekme testi plakalarının üretiminde KOYP metalik ara bağlantı elemanı olarak yaygın kullanıma sahip olan ve KOYP uygulamaları için özel olarak üretilen bir paslanmaz çelik türü olan Crofer (Crofer® 22 APU, ThyssenKrupp VDM GmbH, Werdohl, Almanya) tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan Crofer çekme test plakalarının ölçüleri **Şekil 3(a)**'da verildiği gibidir. **Şekil 3 (b)**'de iki Crofer plaka arasında cam-seramik numunelerin yerleştirilmesi ile çekme test numunelerinin hazırlanma aşamaları verilmiştir.



Şekil 3. Crofer çekme test plakalarının teknik detayları (a), çekme test numunelerinin hazırlanması (b), fırınlama reçetesi (c) ve çekme testi (d)

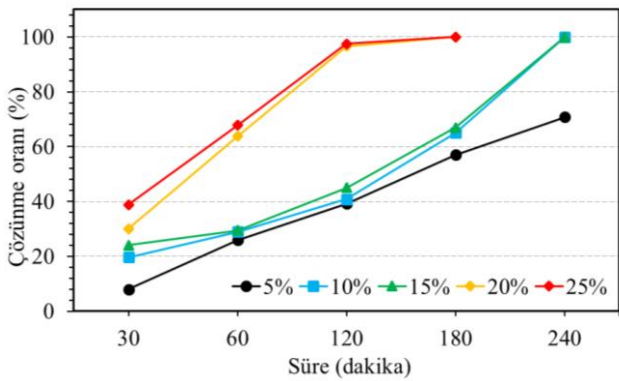
Yüzey pürüzlülüğünün çekme sonuçları üzerindeki etkisini bertaraf etmek amacıyla Crofer yapışma yüzeyleri ince bir zımpara yardımı ile homojen hale getirilmiştir. Fırınlama öncesi çekme test numunelerinin destek taşları ile konumları sabitlenmiş ve yapışmayı desteklemek amacıyla bir ağırlık taşı kullanılmıştır. Ardından ilgili düzenek **Şekil 3(c)**'de detayları verilen ısıtma reçetesinin kullanıldığı bir yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmiştir. Fırınlama işlemi sonrası çekme test numuneleri elde edilmiş ve yapışma dayanımları oda sıcaklığında 1 mm/dakika çekme hızı altında bir çekme test cihazı (Shimadzu Autograph AG-IS, Kyoto, Japonya) ile ölçülmüştür (**Şekil 3d**). Her bir numune için, kırılma anında ölçülen yük değeri kullanılarak **Denklem (2)**'de verilen eşitlik yardımı ile yapışma mukavemetleri hesaplanmıştır. Denklemde verilen σ_F yapışma mukavemeti (MPa), F kırılma anındaki kuvvet değeri (N) ve A yapışma yüzey alanını ($4.0 * 12.5 = 50.0 \text{ mm}^2$) temsil etmektedir.

$$\sigma_F = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Kırılgan cam-seramik benzeri malzemelerde yapıda bulunan doğal bir kusur sebebiyle çatlak yayılması kusurun boyutuna göre değiştiğinden [29] her bir numuneden farklı ölçüm sonuçları elde edilmesi beklenen bir durumdur. Bu açıdan bu tarz malzemeler için tek bir numuneden elde edilen sonuç güvenli olmayacağından bu çalışmada 15 adet çekme test numunesi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, kırılma malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan iki parametrelili Weibull dağılımı yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir [30].

3 Bulgular ve tartışma

Sinterlenmiş cam-seramik numunelerden nitrik asit çözelti saflığına ve bekletme süresine bağlı olarak elde edilen çözünme oranları **Şekil 4**'te sunulmuştur.



Şekil 4. Çözünme deneyi sonuçları

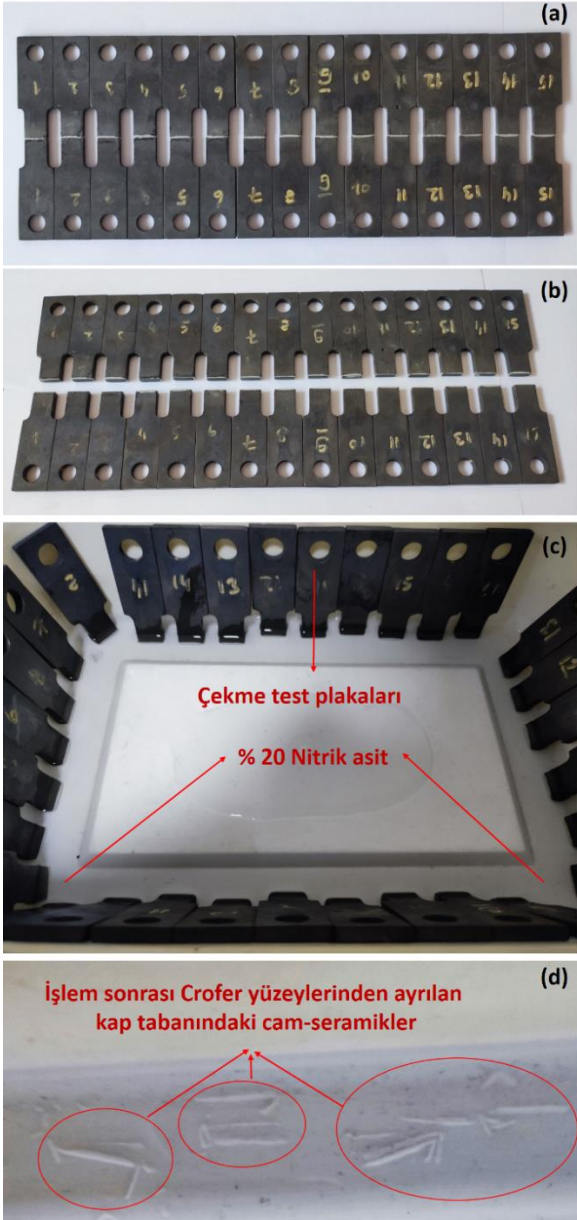
Şekilde görüldüğü üzere %5 nitrik asit çözeltisi haricinde diğer durumlar için çalışmada ilgilenilen bekletme süreleri için %100 oranında çözünme/ayırışma gerçekleşmiştir. Cam-seramiklerin %10 ve %15 saflıktaki çözelti içerisinde benzer çözünme davranışı sergilediği görülmüştür. Benzer durum %20 ve %25 saflığa sahip çözelti için de geçerlidir. %20 ve %25 saflığa sahip çözelti için %100 oranında çözünme 180 dakika sürede;

%10 ve %15 saflığa sahip çözelti için ise 240 dakikada gerçekleşmektedir. Diğer taraftan, %5 oranına sahip çözelti için 180 dakika ve 240 dakika bekletme süresi için sırası ile %57 ve %71 çözünme oranı elde edilmiştir. Dahası %5 için 300 dakikalık ek bir durum incelenmiş ve %85 oranında bir çözünme tespit edilmiştir. Bu haliyle %5 saflığa sahip nitrik asit çözeltisinde tamamen çözünme işleminin çok daha uzun bir süre gerektirdiği görülmektedir. İşlem süresi ve artan nitrik asit saflığının çevre/insan sağlığı üzerinde etkisi düşünülerek bu çalışma için optimum durum %20 nitrik asit ve 180 dakika bekletme süresi olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullar daha sonra çalışma sıcaklığı sonrasında metalik ara bağlantı yüzeyine yapışmış olan cam-seramiklerin çözündürülmesi sürecinde uygulanmıştır.

Metalik yüzeylerin kimyasal işlem sonrası tekrar kullanımı durumunun incelenmesi ve sızdırmazlık performansının tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilen çekme testleri öncesi ve sonrası numunelerin görünümü sırasıyla **Şekil 5(a)** ve **Şekil 5(b)**'de verilmiştir. Çekme testi sonrasında Crofer plaka yüzeylerine yapışmış olan cam-seramikleri çözdürmek amacıyla **Şekil 5(c)**'de gösterildiği üzere içerisine %20 saflıkta 100 ml nitrik asit çözeltisi eklenmiş plastik bir kaba çekme plakaları yerleştirilmiş ve 180 dakika boyunca kimyasal işleme tabi tutulmuştur. İşlem sonrasında Crofer yüzeylerinden ayrılan cam-seramik malzemelerin kap tabanındaki kalıntıları **Şekil 5(d)**'de görülebilmektedir. İlgili kalıntılar kimyasal işlemin başarılı bir şekilde gerçekleştiğine dair ilk kanıtlar olarak değerlendirilebilir.

Yapışma yüzeylerinin çekme testinden hemen sonra (solda) ve kimyasal işlem sonrasında (ortada) elde edilen mikroskop görüntüleri ise **Şekil 6**'da verildiği gibidir. Şekilde ayrıca kimyasal işlem sonrası yüzeylerde kalan kalıntıların plastik bir fırça yardımıyla uzaklaştırılması ve kurulanması sonrası elde edilen nihai yüzey görüntüleri (sağda) sunulmuştur. Bu aşamada çekme test sonuçlarından elde edilen en düşük (**Şekil 6a**), ortalama (**Şekil 6b**) ve en yüksek (**Şekil 6c**) yapışma mukavemeti sergileyen numune yüzeyleri incelenmiştir. Şekilde verilen nihai yüzey görüntülerinden anlaşılacağı üzere kimyasal işlem başarılı bir şekilde gerçekleşmiş ve yüzeylere yapışan cam-seramik malzemeler tamamen yüzeylerden ayrılmıştır. **Şekil 6**'dan ayrıca çekme testi esnasında en düşük ve ortalama değere sahip numunelerde kırılmanın cam-seramik malzemenin ortalarından; en yüksek yapışma dayanımı gösteren numunede ise kırılmanın kısmen Crofer yüzeylerinden gerçekleştiği görülmüştür. **Şekil 6(c)**'de cam-seramik malzemelerin Crofer yüzeylerinden uzaklaştırılması sonrası bağlandığı yüzeyde oksit benzeri bir tabaka olduğu fakat açık Crofer yüzeylerinde kimyasal işlem sonrasında herhangi bir tabaka oluşumunun olmadığı da görülmektedir. İlgili tabaka bir tel fırça yardımı ile yüzeyden uzaklaştırılabilecek olsa da herhangi bir müdahale yapılmayıp bu tabakanın yapışma mukavemeti üzerine etkisini incelemek amacıyla doğrudan bir sonraki çekme test numuneleri hazırlanmıştır. Yüzeylerinde oksit tabakanın bulunduğu Crofer plakalar ile gerçekleştirilen çekme testi sonrası yeniden kimyasal işleme tabi tutulan numune

yüzeylerine ait mikroskop görüntüleri ise Şekil 6'ya benzer olarak Şekil 7(a-c)'de verilmiştir. Nihai yüzey görünümlerinden (sağda) ilgili numunelere tekrar uygulanan kimyasal işlemin de başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve cam-seramik malzemeleri yüzeyden uzaklaştırdığı tespit edilmiştir. Ek olarak Şekil 7(d)'de tüm numunelere ait ayrılma yüzeylerinden görülebileceği gibi bir önceki çekme testi numunelerinden farklı olarak kırılmanın ağırlıklı olarak Crofer yüzeylerinden gerçekleştiği de tespit edilmiştir.

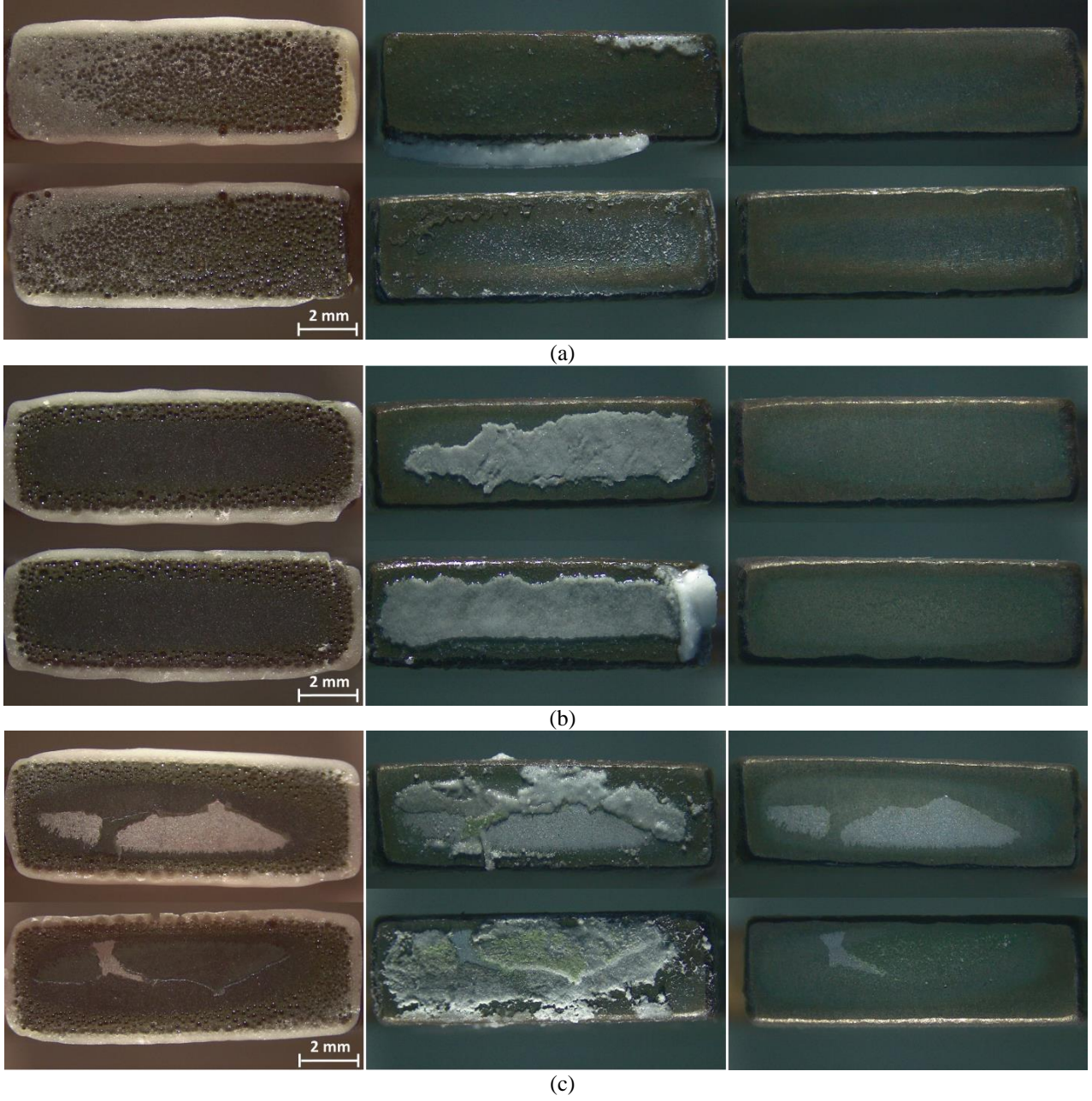


Şekil 5. Çekme testi öncesi (a) ve sonrası (b) numune görünümleri, Crofer plakaların kimyasal işlem süreci (c) ve işlem sonrası kalıntılar (d)

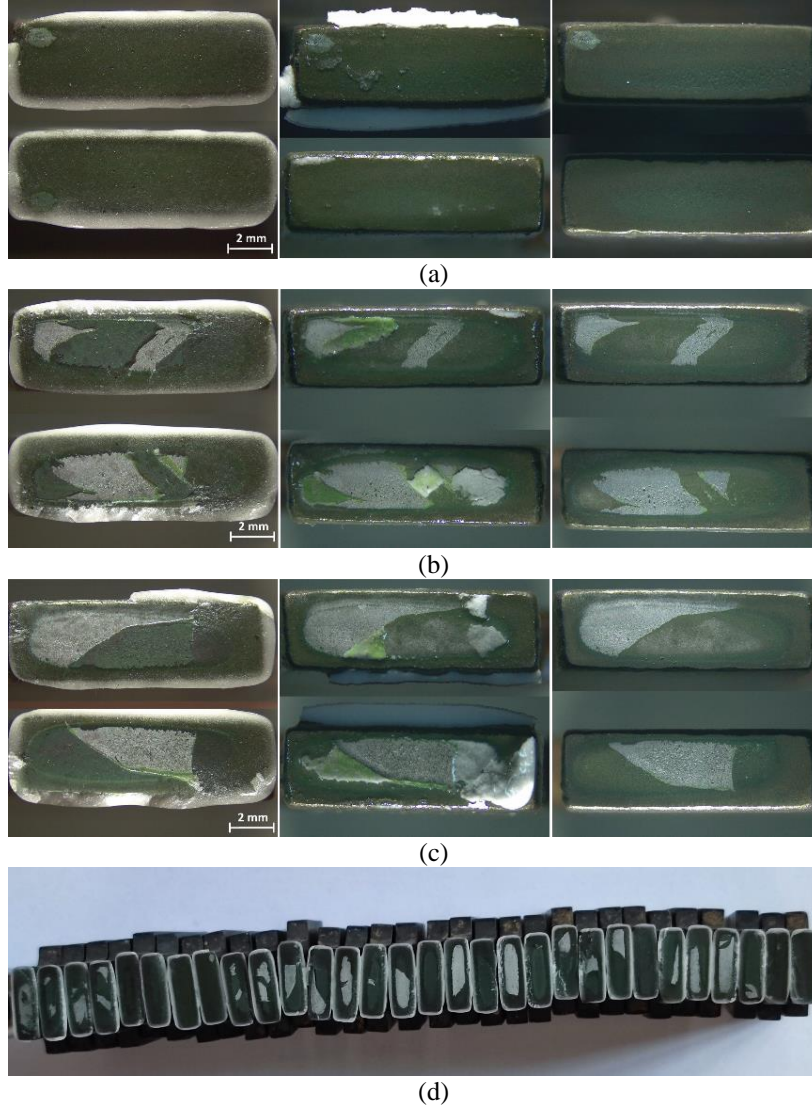
Kimyasal işlem öncesi (KİÖ) yüzeylere sahip ve kimyasal işlem sonrası (KİS) oksit tabakalı yüzeylere sahip numuneler ile gerçekleştirilen çekme testi sonuçları ise Şekil 8'de sunulmuştur. Şekil 8(a) Weibull analizi sonucunda ortaya çıkan güvenilirlik eğrilerini; Şekil 8(b) %63.2

(Weibull) güvenilirlik değerine karşılık gelen yapışma mukavemeti değerlerini göstermektedir. 15 adet numuneden elde edilen sonuçların dağılımı ile ortaya çıkan güvenilirlik eğrilerinden istenilen güvenilirlik oranlarına tekabül eden değerler kullanılabilirlikle birlikte kabul gören yaklaşım %63.2 güvenilirlik oranına denk gelen değer kullanılmasıdır. Şekilden görülebileceği üzere KİÖ durumunda 13.04 MPa (en düşük 9.40 MPa; en yüksek 28.84 MPa) elde edilen yapışma mukavemeti KİS durumunda 22.16 MPa (en düşük 11.76 MPa; en yüksek 43.08 MPa) değerine yükselmiştir. Bu haliyle uygulanan kimyasal işlemin, sadece yüzeyde yapışan cam-seramikleri başarılı bir şekilde uzaklaştırmakla kalmayıp yapışma mukavemetini %70 oranında iyileştirebileceği de tespit edilmiştir. Bu iyileşmeye sebep olacak faktörlerden biri yüzeydeki oksit tabaka varlığıdır. Bu bulguyu destekleyen sonuçların rapor edildiği çalışmalar literatürde mevcut olup bunlar arasında Çelik [31] tarafından cam-seramik malzemelerin yapışma mukavemeti, yüzeyleri oksitlenmemiş ve 870 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca fırınlanarak oksitlendirilmiş Crofer plakalar kullanılarak incelenmiş ve çekme testi sonuçlarına göre oksit tabakaya sahip numunelerden %40 daha fazla yapışma mukavemeti elde edildiği bildirilmiştir. Benzer şekilde bir başka çalışmada Li vd. [32] tarafından iki farklı içeriğe sahip cam-seramikler ile test plakası olarak oksitlenmemiş ve hava ortamında 750 °C sıcaklıkta 50 saat boyunca oksitlenmiş Fe-16Cr alaşım malzeme kullanılarak gerçekleştirilen mekanik testler sonucunda oksitlenmiş olanlardan cam-seramik içeriğine bağlı olarak %92.4 ve %99.5 oranında iyileşme tespit edilmiştir. İlgili çalışmalardan da görülebileceği gibi oksit tabakanın yapışma mukavemeti üzerinde ciddi bir etkisinin olduğu ortadadır.

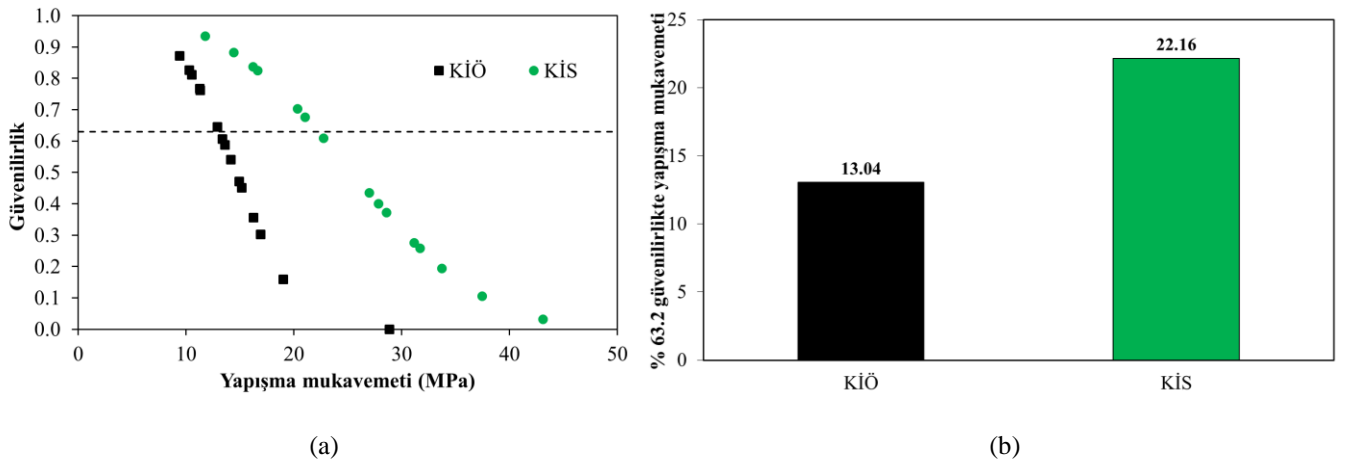
Oksit tabaka varlığının yanında elde edilen %70 oranındaki iyileşmeye sebep olabilecek bir diğer etkinin yüzey pürüzlülüğü olması ihtimali üzerinde durulmuştur. Pürüzlü yüzeylerde temas alanının artması sonucunda yapışmanın iyileşmesi beklenebilir. Bu kapsamda Şekil 9'da kimyasal işlem aşamalarına ait yüzey mikroskop görüntüleri (a-d) ile iki ve üç boyutlu yüzey haritaları (e-h) sunulmuştur. Kimyasal işlem öncesine (Şekil 9a) ait yüzey için elde edilen iki ve üç boyutlu yüzey haritaları sırasıyla Şekil 9(e) ve Şekil 9(f)'de verilmişken; işlem sonrası (Şekil 9d) yüzey için benzer şekilde Şekil 9(g) ve Şekil 9(h)'de verilmiştir. Şekilde yüzey topografyaları ile birlikte verilen ve mor-kırmızı aralığında ölçeklendirilen renk skalasından çukur ve tepelere ait yükseklik değerleri okunabilmektedir. Cihaz kullanıcı arayüzünden ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (R_a), kimyasal işlem öncesi ve sonrası yüzeyler için sırasıyla 86.7 nm ve 396.2 nm olarak elde edilmiştir. Bu haliyle R_a değerinde kimyasal işlem sonrası ~3.6 katlık bir artış söz konusudur. Diğer taraftan literatürde yüzey pürüzlülüğünün yapışma mukavemeti üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada R_a değerinde ~60 katlık bir artışa karşılık yapışma mukavemeti değerinde %30 oranında bir iyileşme tespit edildiği bildirilmiştir [33]. Buradan yüzey pürüzlülüğündeki artışın sızdırmazlık performansındaki %70'lik iyileşme üzerinde bir etkisi olduğu fakat baskın sebebin oksit tabaka kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.



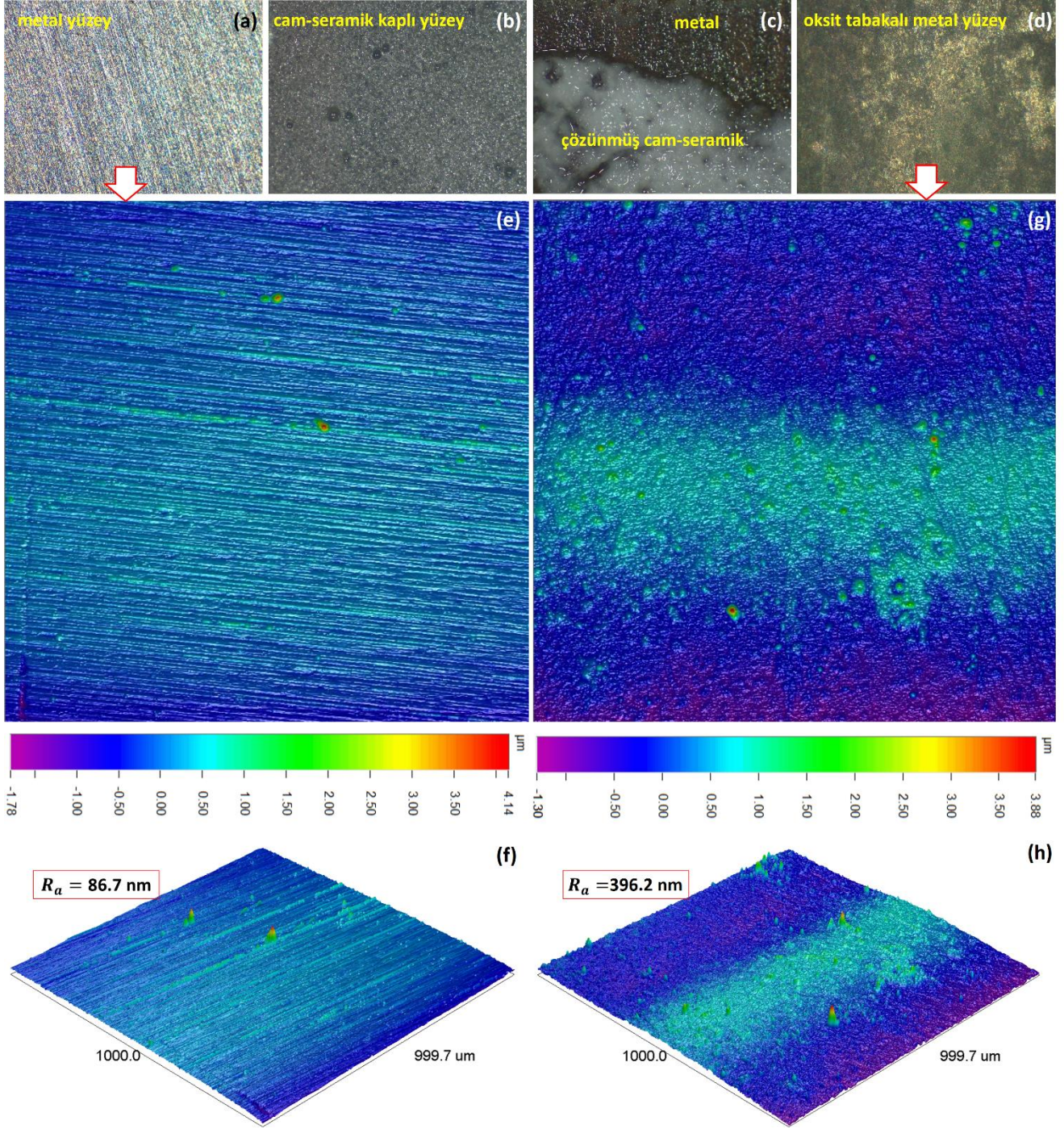
Şekil 6. En düşük (a), ortalama (b) ve en yüksek (c) yapışma mukavemeti sergileyen numunelere ait yapışma yüzeylerinin çekme testi (solda), kimyasal işlem (ortada) ve temizleme/kurulama sonrası (sağda) görünüşleri



Şekil 7. En düşük (a), ortalama (b) ve en yüksek (c) yapışma mukavemeti sergileyen numunelere ait yapışma yüzeylerinin çekme testi (solda), kimyasal işlem (ortada) ve temizleme/kurulama sonrası (sağda) görünüşleri, tüm numunelere ait ayrılma yüzeyleri (d)



Şekil 8. Çekme testleri sonuçlarından elde edilen Weibull güvenilirlik eğrileri (a) ve % 63.2 güvenilirliğe karşılık gelen yapışma mukavemeti değerleri (b)



Şekil 9. Kimyasal işlem öncesi (a), fırınlama sonrası cam-seramik kaplı (b), kimyasal işlem sonrası (c) ve nihai yüzeye ait mikroskop görüntüleri, kimyasal işlem öncesi ve sonrası yüzeylere ait iki (e ve g) ve üç (f ve h) boyutlu yüzey haritaları

Yüksek sıcaklıklar altında çalışan bir metalin yüzeylerinde oksit tabakaların oluşması oksijenin metal malzemeler içerisine daha fazla difüzyonunu önleme noktasında doğal bir koruyucu refleks olarak değerlendirilebilir. Diğer taraftan KOYP için uygun metal malzemelerin belirlenmesinde, krom içeriği yüksek olan alaşımların yaygın olarak tercih edilmesi esasen Cr_2O_3 'ten oluşan oksit tabakanın elektriksel olarak iletken özelliklere sahip olmasıdır [34,35]. Yüksek çalışma sıcaklıklarında cam sızdırmazlık elemanı ve ara bağlantılar arasında krom içeren

ilgili oksit tabakanın oluştuğu iyi bilinmektedir. Fakat oksit tabaka oluşumu esnasında gerçekleşen zararlı kromat formunda krom salınımı cam-seramik sızdırmazlık malzeme performansını etkileyebilmektedir [36]. Bu etkilerin en aza indirilmesi ve krom göçünün önlenmesi için koruma bariyeri görevi görecektir bir tabaka kullanımının etkili bir yöntem olduğu literatürde rapor edilmiştir [37,38]. Diğer taraftan KOYP uygulamalarına özel geliştirilen Crofer malzemedeki ise kromca zengin Cr_2O_3 alt katmana ek olarak koruyucu $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_4$ üst katmanı doğal olarak oluşmakta [39] ve bu

konuda diğer paslanmaz çeliklere kıyasla 3 kat daha düşük krom uçuculuğu sağlanmaktadır [38]. Yine de tam olarak ilgili mekanizmanın önüne geçilemediği de görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile literatürdeki bulgular birlikte değerlendirildiğinde, çıplak Crofer yüzeyinde ilk oksit tabanın oluşumu esnasında bir miktar kromatın cam-seramik içlerine nüfuz ettiği ve mekanik performansı etkilediği sonucuna varılmıştır. Artan yapışma mukavemeti ise hali hazırda cam-seramik içerikleri ile reaksiyona girerek oluşan oksit tabakanın bir bariyer görevi görerek kromatların cam-seramik içlerine erişimini engellediği ve cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının performansını koruduğu ile açıklanabilir. Bu durum kimyasal işlem öncesi cam-seramik numunelerin ortasından; kimyasal işlem sonrası ise cam-Crofer ara yüzeylerinden gerçekleşen kırılma davranışını da açıklamaktadır. İleriki çalışmalarda ise ilgili oksit tabakaların kimyasal içeriklerinin belirlenmesine ek olarak, nitrik asit kullanımının cam-seramik kimyasal bağları üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenecek olup çalışma sonrası cam-seramik malzemelerin sadece metalik yüzeyler ile sınırlı olmayıp hücre destek katmanından uzaklaştırılması üzerine çalışmalar gerçekleştirilecektir.

4 Sonuçlar

KOYP'lerde sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan cam-seramiklerin etkin yapışma gösterdikleri metalik ara bağlantılardan tahribatsız bir şekilde uzaklaştırılması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada nitrik asit kullanımı önerilmiştir. Bu kapsamda farklı nitrik asit çözeltilerinin saflıklarına ve uygulama sürelerine göre sinterlenmiş cam-seramik malzemelerin çözünme davranışı incelenmiştir. İlgilenilen durumlar için %20 nitrik asit çözeltilerinde 3 saat süre ile bekletmenin optimum koşullar olduğu belirlenmiş ve ilgili şartlar fırınlama sonrası metal/cam-seramik numunelere uygulanmıştır. Önerilen kimyasal işlemin metal yüzeylerinden sinterlenmiş cam-seramik malzemeleri başarılı bir şekilde uzaklaştırmada etkili bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Dahası kimyasal işlem görmüş ve görmemiş Crofer numuneler ile gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen yapışma mukavemeti sonuçlarına göre kimyasal işlem gören numunelerde %70 performans artışı tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen mikroskop ve profilometre analizleri ışığında, yapışma mukavemetindeki iyileşmeye artan yüzey pürüzlülüğü yanında esas olarak işlem sonrası yüzeylerde kalan ve cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının mikroyapısını koruma görevi gören oksit tabakanın neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi imkânları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] J.W. Fergus, Sealants for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 147(1-2), 46-57, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.002>.
- [2] M. Mahapatra and K. Lu, Glass-based seals for solid oxide fuel and electrolyzer cells—a review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 67(5-6), 65-85, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.12.002>.
- [3] X.-V. Nguyen, C.-T. Chang, G.-B. Jung, S.-H. Chan, W.-T. Lee, S.-W. Chang and I.-C. Kao, Study of sealants for SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(46), 21812-21819, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.156>.
- [4] F. Smeacetto, M. Salvo, M. Santarelli, P. Leone, G.A. Ortigoza-Villalba, A. Lanzini, L.C. Ajitdoss and M. Ferraris, Performance of a glass-ceramic sealant in a SOFC short stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), 588-596, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.025>.
- [5] K. Singh and T. Walia, Review on silicate and borosilicate-based glass sealants and their interaction with components of solid oxide fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 45(15), 20559-20582, 2021. <https://doi.org/10.1002/er.7161>.
- [6] D.U. Tulyaganov, A.A. Reddy, V.V. Kharton and J.M.F. Ferreira, Aluminosilicate-based sealants for SOFCs and other electrochemical applications – A brief review. *Journal of Power Sources*, 242, 486-502, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.099>.
- [7] M. Garai, A.R. Molla, A.A. Reka and B. Karmakar, Wide thermal expansion in Ag₀/Au₀ nanoparticle doped SiO₂-MgO-Al₂O₃-B₂O₃-K₂O-MgF₂ glass-ceramics. *Materials Today: Proceedings*, 50, 134-138, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.549>.
- [8] M. Garai and S. Roy, Performance evaluation for Ag and Au nanoparticle containing K₂O-MgO-B₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-F glass sealants for SOFC application. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 5(2), e10172, 2023. <https://doi.org/10.1002/ces2.10172>.
- [9] B. Timurkutluk, Y. Ciflik and H. Korkmaz, Strength evaluation of glass-ceramic composites containing yttria stabilized zirconia after thermal cycling. *Ceramics International*, 41(5), 6985-6990, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.153>.
- [10] Y.-S. Chou, J.W. Stevenson and R.N. Gow, Novel alkaline earth silicate sealing glass for SOFC: Part II. Sealing and interfacial microstructure. *Journal of Power Sources*, 170(2), 395-400, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.060>.
- [11] M. Garai, S.P. Singh and B. Karmakar, Mica (KMg₃AlSi₃O₁₀F₂) based glass-ceramic composite sealant with thermal stability for SOFC application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45), 23480-23488, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.252>.

- [12] Z. Li, B. Peng, T. Zhang, H. Li, L. Li, C. Wen and K. Chen, Improving sealing performance of borosilicate glass-ceramics for solid oxide fuel cell applications: Effect of AlN. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(14), 4194-4201, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.05.048>.
- [13] M.F. Hasanabadi, M. Faghihi-Sani, A. Kokabi, S. Groß-Barsnick and J. Malzbender, Room-and high-temperature flexural strength of a stable solid oxide fuel/electrolysis cell sealing material. *Ceramics International*, 45(1), 733-739, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.236>.
- [14] E.V. Stephens, J.S. Vetrano, B.J. Koepfel, Y. Chou, X. Sun and M.A. Khaleel, Experimental characterization of glass-ceramic seal properties and their constitutive implementation in solid oxide fuel cell stack models. *Journal of Power Sources*, 193(2), 625-631, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.02.080>.
- [15] M. Ferraris, S. De la Pierre, A. Sabato, F. Smeacetto, H. Javed, C. Walter and J. Malzbender, Torsional shear strength behavior of advanced glass-ceramic sealants for SOFC/SOEC applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(12), 4067-4075, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.034>.
- [16] C.-K. Lin, T.-W. Lin, S.-H. Wu, W.-H. Shiu, C.-K. Liu and R.-Y. Lee, Creep rupture of the joint between a glass-ceramic sealant and lanthanum strontium manganite-coated ferritic stainless steel interconnect for solid oxide fuel cells. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(5), 2417-2429, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.01.016>.
- [17] C.-K. Lin, Y.-A. Liu, S.-H. Wu, C.-K. Liu and R.-Y. Lee, Joint strength of a solid oxide fuel cell glass-ceramic sealant with metallic interconnect in a reducing environment. *Journal of Power Sources*, 280, 272-288, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.126>.
- [18] B. Timurkutluk, T. Altan, S. Celik, C. Timurkutluk and Y. Palaci, Glass fiber reinforced sealants for solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 18308-18318, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.116>.
- [19] M. Jabbari, R. Bulatova, A. Tok, C. Bahl, E. Mitsoulis and J.H. Hattel, Ceramic tape casting: a review of current methods and trends with emphasis on rheological behaviour and flow analysis. *Materials Science and Engineering: B*, 212, 39-61, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.07.011>.
- [20] A.O. Zhigachev, E.A. Agarkova, D.V. Matveev and S.I. Bredikhin, CaO-SiO₂-B₂O₃ Glass as a Sealant for Solid Oxide Fuel Cells. *Ceramics*, 5(4), 642-654, 2022. <https://doi.org/10.3390/ceramics5040047>.
- [21] K. Kanbara, N. Uchida, K. Uematsu, T. Kurita, K. Yoshimoto and Y. Suzuki, Corrosion of silicon nitride ceramics by nitric acid. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 287, 533, 1992. <https://doi.org/10.1557/PROC-287-533>.
- [22] I. Ropuš, L. Čurković, H. Cajner and S. Rončević, Optimization of alumina ceramics corrosion resistance in nitric acid. *Materials*, 15(7), 2579, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15072579>.
- [23] H. Jang, Y. Chung, S. Whangbo, T. Kim, C. Whang, S. Lee and S. Lee, Effects of chemical etching with nitric acid on glass surfaces. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 19(1), 267-274, 2001. <https://doi.org/10.1116/1.13>.
- [24] T.H. Elmer and M.E. Nordberg, Solubility of silica in nitric acid solutions. *Journal of the American Ceramic Society*, 41(12), 517-520, 1958. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb12907.x>.
- [25] M.D.L. de Castro and J.L.L. García, Chapter 5 - Microwave-assisted solid sample treatment. in: M.D.L. de Castro, J.L.L. García (Eds.), *Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry*, Elsevier, pp. 179-232, 2002.
- [26] A. Iversen and B. Leffler, 3.04 - Aqueous Corrosion of Stainless Steels. in: B. Cottis, M. Graham, R. Lindsay, S. Lyon, T. Richardson, D. Scantlebury, H. Stott (Eds.), *Shreir's Corrosion*, Elsevier, pp. 1802-1878, Oxford, 2010.
- [27] S. Ningshen, U. Kamachi Mudali, G. Amarendra and B. Raj, Corrosion assessment of nitric acid grade austenitic stainless steels. *Corrosion Science*, 51(2), 322-329, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.038>.
- [28] SCHOTT UK Ltd., Technical Details of Sealing and Solder Glass Frits. <https://www.schott.com/en-gb/products/sealing-and-solder-glass-p1000291/technical-details>, Accessed 1 January 2025.
- [29] D. Munz, Fracture Mechanics: Linear Elastic. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 3300-3306, 2001. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00589-1>.
- [30] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of applied mechanics*, 18(3), 293-297, 1951. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>.
- [31] S. Celik, Influential parameters and performance of a glass-ceramic sealant for solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 41(2, Part B), 2744-2751, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.089>.
- [32] R. Li, M. Tao, P. Wang, J. Yang, B. Ma, B. Chi and J. Pu, Effect of interconnect pre-oxidation on high-temperature wettability and mechanical properties of glass seals in SOFC. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(12), 6172-6182, 2021. <https://doi.org/10.1111/jace.18024>.
- [33] T. Altan and S. Celik, Effect of surface roughness of the metallic interconnects on the bonding strength in solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35118-35129, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.136>.
- [34] T. Zhang, R.K. Brow, W.G. Fahrenholtz and S.T. Reis, Chromate formation at the interface between a solid oxide fuel cell sealing glass and interconnect alloy. *Journal of Power Sources*, 205, 301-306, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.043>.
- [35] W.N. Liu, X. Sun, E. Stephens and M.A. Khaleel, Life prediction of coated and uncoated metallic interconnect

- for solid oxide fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 189(2), 044-1050, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.143>.
- [36] M.A. Laguna-Bercero, *High temperature electrolysis*. Springer Nature, Switzerland, 2023.
- [37] B. Hua, J. Pu, W. Gong, J. Zhang, F. Lu and L. Jian, Cyclic oxidation of Mn-Co spinel coated SUS 430 alloy in the cathodic atmosphere of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 185(1), 419-422, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.06.055>.
- [38] Z. Yang, G.-G. Xia, X.-H. Li and J.W. Stevenson, (Mn,Co)3O4 spinel coatings on ferritic stainless steels for SOFC interconnect applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(16), 3648-3654, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.08.048>.
- [39] Y.-S. Chou, J.W. Stevenson and P. Singh, Effect of pre-oxidation and environmental aging on the seal strength of a novel high-temperature solid oxide fuel cell (SOFC) sealing glass with metallic interconnect. *Journal of Power Sources*, 184(1), 238-244, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.06.020>.





Farklı standartlaştırılmış indis yöntemleri ile Bartın ilinin meteorolojik kuraklıklarının analizi

Analysis of meteorological droughts of Bartın province with different standardized drought index methods

Emre Ablak^{1,*} , Ecem Tuncer Uysal² , Ahmet Kumanlıoğlu^{3,*} 

^{1,2,3}Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye

Öz

Yağışların uzun dönem ortalamalarının altında kalmasıyla meydana gelen meteorolojik kuraklıkların belirlenmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminde önemli bir rol oynar. Meteorolojik kuraklık, süresi, şiddeti ve yoğunluğu gibi özellikleriyle hidrolojik ve tarımsal kuraklıkların oluşumunu ve niteliklerini doğrudan etkiler. Bu süreçlerin açıklanmasında kullanılan indis yöntemleri, yağış miktarı, sıcaklık ve potansiyel evapotranspirasyon gibi faktörlere dayalı olarak meteorolojik kuraklık olaylarını tanımlar. Batı Karadeniz Havzası'nda yer alan Bartın ili için 1970-2020 yılları arasında 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemlerde meteorolojik kuraklıklar incelenmiştir. Meteorolojik kuraklıkların tespitinde Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI), Standartlaştırılmış Yağış ve Evapotranspirasyon İndisi (SPEI) ve Standartlaştırılmış Yağış ve Sıcaklık İndisi (SPTI) yöntemleri kullanılmıştır. Üç farklı standardize indis yöntemiyle yapılan analizlerde, farklı zaman dilimlerinde tüm kuraklık sınıflarının gözlemlendiği tespit edilmiştir. Çalışmada, uzun dönemli (12 aylık) kuraklıkların karakteristik özellikleri Run (gidişler) teorisi ile değerlendirilmiş ve en şiddetli kuraklık döneminin 1981-1982 yılları arasında gerçekleştiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: SPI, SPEI, SPTI, Kuraklık, Bartın

1 Giriş

Kuraklık, belirli bir bölgede nem miktarındaki geçici azalmadan kaynaklanan ve su kıtlığına yol açan doğal bir iklim olayıdır. Bu olgu, zaman ve mekan açısından sınırlı olmaksızın her yerde ve her dönemde meydana gelebilir. Kuraklık, yağış miktarının optimal seviyenin altına düşmesiyle ortaya çıkan ve arazi ile kaynak üretim sistemleri üzerinde olumsuz etkiler yaratan, önemli hidrolojik değişikliklere yol açan doğal bir olaydır [1]. Ayrıca, yağışların kayıtlı normal seviyelerinin belirgin şekilde altına düşmesi sonucunda toprak ve su kaynaklarının olumsuz etkilenmesi olarak da tanımlanmaktadır [2,3]. Kuraklığın başlangıç ve bitiş noktalarının net olmaması, etkisinin kümülatif olarak artması, aynı anda birden fazla kaynağı etkilemesi ve ekonomik boyutunun büyük olması, onu diğer afetlerden ayıran en belirgin özellikleridir [4].

Abstract

Identifying meteorological droughts, which occur as a result of precipitation falling below long-term averages, plays a vital role in the sustainable management of water resources. The characteristic features of the drought process, such as duration, severity and intensity, which begin with meteorological drought, also affect the formation and characteristics of hydrological and agricultural droughts. Therefore, index-based methods characterize meteorological drought processes by utilizing factors like precipitation, temperature, and potential evapotranspiration. In the study conducted for Bartın province, located within the Western Black Sea Basin, meteorological droughts were examined in 1, 3, 6 and 12-month time scales between 1970 and 2020. The identification of meteorological droughts was performed using three standardized indices: the Standardized Precipitation Index (SPI), the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), and the Standardized Precipitation Temperature Index (SPTI). The analysis revealed that, across different temporal scales, all drought severity classes were observed. Furthermore, the long-term (12-month) drought characteristics were assessed using Run Theory, identifying the most severe dry period as occurring between 1981 and 1982.

Keywords: SPI, SPEI, SPTI, Drought, Bartın

Kuraklık süreçlerinin başlangıcını, bitişini ve şiddetinin belirlenmesi amacıyla standartlaştırılmış yağış indeksi (SPI) [5], standartlaştırılmış yağış evapotranspirasyon indeksi (SPEI) [6], standartlaştırılmış yağış sıcaklık indeksi (SPTI), normalin yüzdesi indeksi (PNI) ve ondalıklar indeksi (DI) gibi pek çok indeks yöntemi geliştirilmiştir. Kuraklık karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde hızlı ve doğru sonuçlar veren indeks yöntemlerinden standartlaştırılmış indis yöntemleri olan SPI, SPEI ve SPTI yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır [7, 8]. Kurak süreçlerin belirlenmesinde SPI yöntemi sadece yağış verilerini kullanırken, SPEI yöntemi yağış ve evapotranspirasyon verilerini, SPTI yöntemi ise yağış ve sıcaklık verilerini kullanmaktadır [3,10]. SPI hesaplamasında yalnızca yağış verisi gerektirdiğinden veri toplama ve uygulama açısından diğer indislere göre en kolay yöntemdir. Kuraklık süreçlerinde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahmet.kumanlioglu@cbu.edu.tr (A. A. Kumanlıoğlu)

Geliş / Received: 30.10.2024 Kabul / Accepted: 09.01.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1575949

sadece yağışın etkisini gösterip yalnızca meteorolojik kuraklığı analiz eder. SPEI indis yöntemi yağış ve potansiyel evapotranspirasyon arasındaki farkı yani zemin nemi açığını kullanarak hesaplamaları yapmaktadır. Zemin nemi açığı, iklim değişikliği etkilerinin bir sonucu olarak ta karşımıza çıktığından SPEI indis yöntemi meteorolojik ve tarımsal kuraklık ile beraber kuraklıklarda su dengesi ve iklim değişikliği etkilerini anlamak için kullanılabilir. SPTI indis yöntemi ise yağış verileri ile beraber sıcaklık verilerini kullanarak kuraklık indis değerlerini hesaplamaktadır. İndis değerlerinin hesaplanmasında sıcaklık verilerinin kullanılması kurak süreçlerde sıcaklık değişiminin etkisini göstermektedir [2, 3, 9, 10, 11, 12]. SPI, SPEI ve SPTI gibi standartlaştırılmış kuraklık indeksleri, normal dağılımlı standartlaştırılmış z değerlerinde sahip meteorolojik gözlemlerle ifade edilir. Bu sebeple, "0" indeks değeri ortalama yani normal koşulları, pozitif değerler nemli dönemleri, negatif değerler ise kurak dönemler belirtir [3,9].

Dünyada ve ülkemizde, SPI, SPEI ve SPTI yöntemleri kullanılarak il ve/veya havza ölçeğinde meydana gelen kuraklıkların belirlenmesine yönelik pek çok çalışma mevcuttur. Lorenzo ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada, İber Yarımadası'ndaki meteorolojik kuraklıkların oluşumunu ve mekânsal değişikliklerini SPI yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, 3 ve 12 aylık iki zaman ölçeğinde yapılan incelemeler sonucunda, 3 aylık meteorolojik kuraklıkların Doğu İber Yarımadası'nda daha az sıklıkla, ancak daha yoğun ve kalıcı olarak gerçekleşeceği ve RCP 8.5 senaryosunun geçerli olacağı gösterilmiştir. 21. yüzyılın ilk on yıllarında, 12 aylık dönemdeki meteorolojik kuraklıkların RCP 4.5 senaryosuna göre İber Yarımadası'nın kuzeybatı bölgesinde daha yaygın ve şiddetli olacağı öngörülmüştür [13]. Le ve ark. (2024), Tayvan'daki tayfun parametreleri ile SPI indeksi ile elde edilen kuraklık süreçleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda Tayvan'daki tayfun özellikleri (sayı, süre, uzunluk, rüzgâr hızı) ile kuraklık oluşumu ve şiddeti arasında 2-4 yıllık zaman süreçlerinde pozitif bir korelasyon tespit etmişlerdir [14]. Kuraklık süreçlerini inceleyen Khan ve ark. (2021), Pakistan'ın farklı meteoroloji istasyonları için SPI ve SPTI indislerini kullanarak kuraklık olaylarının modellenmesinde iki boyutlu Copula dağılımlarını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, SPI ve SPTI indisleri ile elde edilen kuraklık süreçlerini karşılaştırmışlardır [15]. Ülkemizde yapılan çalışmalarda, Kumanlıoğlu (2023), İzmir ilini besleyen Tahtalı ve Gördes baraj havzalarının 1950-2017 yılları arasındaki 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemlerdeki meteorolojik ve hidrolojik kuraklıklarını belirlemiştir. Çalışmada meteorolojik kuraklıklar, SPI, SPEI ve SPTI standartlaştırılmış kuraklık indisleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, 2000 yılından önce meydana gelen kuraklıkların oluşumunda yağışların daha belirleyici olduğu, 2000 yılından sonra ortaya çıkan kurak süreçlerde ise zemin nemi açığını artıran evapotranspirasyon sürecinin daha baskın hale geldiği görülmüştür [9]. Durmuş ve Bulut (2023) yaptıkları çalışmada Batı Akdeniz bölgesinde 1980-2019 yılları arasında farklı zaman dilimlerinde oluşan ekstrem kuraklık şartlarını SPEI yöntemi ile belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda bölgede en fazla ekstrem kuraklık

olaylarının Burdur ilinde meydana geldiği ve genel olarak kıyı kesimlerin nemlilik eğiliminde olduğu fakat iç kesimlerde kuraklık eğiliminde olduğunu belirlemişlerdir [16].

Karadeniz Bölgesi'nin meteorolojik kuraklarında belirlenmesine yönelik çalışmalarda, Öztürk ve Ünlü (2024) çalışmada Karadeniz Bölgesi'nin 1960-2020 yılları arasında meydana gelen meteorolojik kuraklık süreçlerini SPI yöntemi kullanılarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonuçları, bölgenin coğrafi yükseltilerinin etkisiyle genel bir kurak veya nemli dönemin olmadığı, doğu-batı yönünde ve kıyı ile iç kesimlerde kuraklık ve nemlilik dönemlerinin farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur [17]. Bozkurt Yıldız (2021) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında Karadeniz Bölgesindeki 33 meteorolojik gözlem istasyonundan elde edilen verileri kullanarak meteorolojik kuraklıkları SPI ve Keşif Kuraklık İndeksi (RDI) yöntemleri ile araştırmıştır. Yüksek lisans tezi sonucunda Karadeniz Bölgesi'ndeki kuraklık olaylarının zaman artış gösterdiğini ve özellikle yaz ve sonbahar aylarında kuraklık eğilimlerinin daha fazla olduğu belirtmiştir [18]. Yüce ve ark. (2022), Samsun ili 1938-2020 yılları arasındaki meteorolojik kuraklık analizlerini SPI ve SPEI yöntemlerini kullanarak yapmışlardır. Çalışmada sonucunda 1 aylık zaman serilerinde SPI ve SPEI arasında güçlü bir ilişki bulunmuş; ancak 3, 6, 9, 12 ve 24 aylık zaman serilerinde bu ilişki nispeten azaldığını göstermişlerdir. Çalışmada ayrıca 1950 yılında hem süre hem de şiddet açısından uzun süren bir kurak dönem meydana geldiğini belirtmişlerdir [19].

Bartın ili için yapılan meteorolojik kuraklık çalışmalarda, Patal ve Yavuz (2020) yaptıkları çalışmada, Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Bartın, Bolu, Düzce, Karabük, Kastamonu ve Zonguldak illerinin meteorolojik kuraklıklarını SPI ve De Martonne Kuraklık indis yöntemleri ile belirlemiş ve kuraklıkların eğilimlerini Mann-Kendall trend analizi ile belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda Batı Karadeniz Bölgesi'nde özellikle kış aylarında nemlilikte azalma ve kuraklık eğiliminde artış olduğunu göstermişlerdir [20].

Sunulan çalışmada Batı Karadeniz Havzası'nda bulunan Bartın ili 1970-2020 yılları arasındaki meteorolojik kuraklıkları 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde farklı standartlaştırılmış indis yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada SPI, SPEI ve SPTI standartlaştırılmış indis yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca farklı indis yöntemleri ile belirlenen meteorolojik kuraklıkların 12 aylık zaman ölçeğinde karakteristik özellikleri run (gidişler) analizi ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda Bartın ilinde 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimlerindeki meteorolojik kuraklıklarda tüm kuraklık sınıflarının meydana geldiği ve 12 aylık zaman ölçeğinde en yoğun kurak periyodun 1981-1982 yılları arasında gerçekleştiği belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Uygulama Alanı

Şekil 1'de verilen Bartın ili, Batı Karadeniz Bölgesi'nde 32° 22' doğu boylamı, 41° 37' kuzey enlemi üzerinde bulunmakta olup, 2268 km²'lik yüzölçümüne sahiptir.

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \frac{1}{(H(x))^2}} & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ \sqrt{\ln \frac{1}{1-H(x)^2}} & 0.5 \leq H(x) \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$SPEI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & 0.5 \leq H(x) < 1 \end{cases} \quad (2)$$

Denklem (1)'de $H(x)$ aşılma olasılıklarını, **Denklem (2)**'de c_0, c_1, c_2, d_1, d_2 ve d_3 değerleri sabit değerler olup sırasıyla 2.515517, 0.802853, 0.010328, 1.1432788, 0.189269, 0.01308 değerlerini gösterir.

- Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI)

Vicente-Serrano ve ark. (2010) tarafından geliştirilen indeks yönteminde yağış ve potansiyel evapotranspirasyon değerleri kullanarak farklı zaman dilimlerin gerçekleşen kuraklık süreçlerini belirlemektedir [26]. Potansiyel evapotranspirasyon değerleri Thorntwaite veya Penman-Monteith gibi yöntemler kullanılarak elde edilebilir [3, 9].

SPEI indeks yönteminde kullanılan **Denklem (3)**'te gösterildiği şekilde yağış (P , mm) değerlerinden potansiyel evapotranspirasyon (PET , mm) değerlerini çıkartması ile elde edilen zemin nemi açığı (D , mm) değerlerini kullanarak kuraklık analizini yapmaktadır.

$$D = P - PET \quad (3)$$

Denklem (3) ile hesaplanan zemin nemi açığı (D) değerlerine en uygun olasılık yoğun fonksiyonu kullanılarak elde edilen aşılma olasılıkları $H(x)$ **Denklem (1)** ve **(2)** kullanılarak SPEI indeks değerleri hesaplanır.

- Standartlaştırılmış Yağış Sıcaklık İndeksi (SPTI)

Standartlaştırılmış yağış sıcaklık indeksi Ali ve ark. (2017) tarafından geliştirilmiştir. SPEI indis değerlerinin hesaplanma adımları SPI yöntemi ile aynıdır. Kuraklık indislerinin belirlenmesinde SPI sadece yağış değerlerini kullanırken SPTI değerleri yağış ve sıcaklık verilerini kullanarak **Denklem (4)**'te verilen ifade ile elde edilen Demartone (D) değerlerini kullanmaktadır.

$$D_i = \frac{12 * P_i}{T_i} \quad (4)$$

Denklem (4)'te D , **Denklem (1)** 'de kullanılan $H(x)$ aşılma olasılıklarının belirlenmesinde kullanılan değerleri, P yağış (mm), T sıcaklık ($^{\circ}C$) değerlerini, i ilgili zaman dilimini göstermektedir.

Hesaplanan D değerlerine ait uygun olasılık dağılım fonksiyonu ile hesaplanan $H(x)$ değerleri kullanılarak **Denklem (1)** ve **(2)** yardımı ile SPTI değerleri hesaplanmaktadır.

Kuraklık sınıflandırması

SPI, SPEI ve SPTI indis değerlerinin belirttikleri kuraklık sınıfları **Tablo 2**'de verilmiştir [3].

Tablo 2. Standardize kuraklık indis değerlerine karşı gelen kuraklık sınıfları

İndis değerleri	Kuraklık Sınıfları
SPI, SEI, SPTI > 2.0	Çok şiddetli nemli (ÇŞS)
1.5 < SPI, SEI, SPTI ≤ 2	Şiddetli nemli (ŞS)
1.5 < SPI, SEI, SPTI ≤ 1.0	Orta şiddetli nemli (OŞS)
1.0 < SPI, SEI, SPTI ≤ 0	Hafif şiddetli nemli (HŞS)
-1.0 < SPI, SEI, SPTI ≤ 0	Hafif şiddetli kurak (HŞK)
-1.5 < SPI, SEI, SPTI ≤ -1.0	Orta şiddetli kurak (OŞK)
-2.0 < SPI, SEI, SPTI ≤ -1.5	Şiddetli kurak (ŞK)
SPI, SEI, SPTI ≤ -2.0	Çok şiddetli kurak (ÇŞK)

Zaman serilerinin oluşturulması

Bartın ilin meteorolojik kuraklıkları 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimleri için SPI, SPEI ve SPTI indis yöntemleri ile belirlenmiştir. İndis yöntemlerinde kullanılan farklı zaman dilimlerindeki zaman serileri **Denklem (5)** yardımı ile oluşturulmuştur [3, 9].

$$X_{i,j}^k = \begin{cases} \sum_{l=13-k+j}^{12} Y_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j Y_{i,l} \text{ eğer } j < k \\ \sum_{i=j-k+1}^j Y_{i,l} \text{ eğer } j \geq k \end{cases} \quad (5)$$

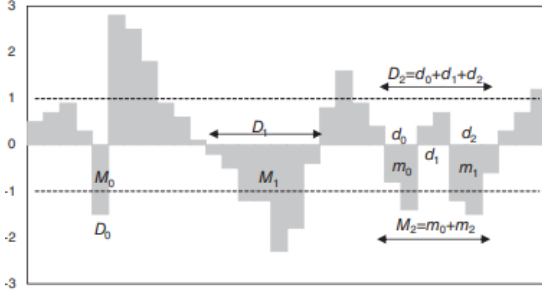
Denklem (5)'te X , istenilen zaman serisini, Y SPI'da yağışları, SPEI'de zemin nemi açığını (D) ve SPTI yönteminden Demartone (D) değerlerini göstermektedir. $Y_{i,j}^k$ olarak gösterilen kısımda j verilen ayı, i seçilen zamanı, k ise seçilen zaman dilimini göstermektedir.

2.1.2 Run Analizi (Gidişler Analizi)

Yevjevich (1967) tarafından geliştirilen Run analizi, kuraklıkların süresini, şiddetini ve yoğunluğunu tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemde, kuraklık indislerine göre eşik değerler belirlenir. Çalışma kapsamında, standardize edilmiş kuraklık indislerine dayalı eşik değerleri (-1, 0, 1) olarak belirlenmiştir. Kuraklık süresi (D), negatif indis değerlerinin gözlemlendiği dönemleri ifade ederken, kuraklık şiddeti (M), bu süre zarfında hesaplanan indis değerlerinin toplamı olarak tanımlanır. Kuraklık yoğunluğu (I) ise şiddetin süreye oranı (M/D) şeklinde tanımlanmıştır [3, 9, 27].

Şekil 2'de görüldüğü üzere, kuraklık olayları farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Bir kuraklık olayı, negatif eşik değerinin altında tek bir ay süresince D_0 ve M_0 şiddetinde devam edebileceği gibi, birkaç ay boyunca D_1 ve M_1

şiddetinde meydana gelirse de tek bir kuraklık olayı olarak kabul edilir. İki kuraklık olayı arasındaki süre 6 ay veya daha kısa ise, bu durum da tek bir kuraklık olayı olarak değerlendirilir. Bu durumda, D_2 süresi d_0 , d_1 ve d_2 sürelerinin toplamı ile belirlenirken, M_2 şiddeti m_0 ve m_1 şiddetlerinin toplamı üzerinden hesaplanır. M_2 şiddeti ise m_0 ve m_1 şiddetlerinin toplamı ile hesaplanır [3, 9, 27].



Şekil 2. Run analizi

3 Bartın ili meteorolojik kuraklık analizleri

3.1 Bartın ili meteorolojik kuraklıkların gidiş eğrileri ve kuraklık sınıfları

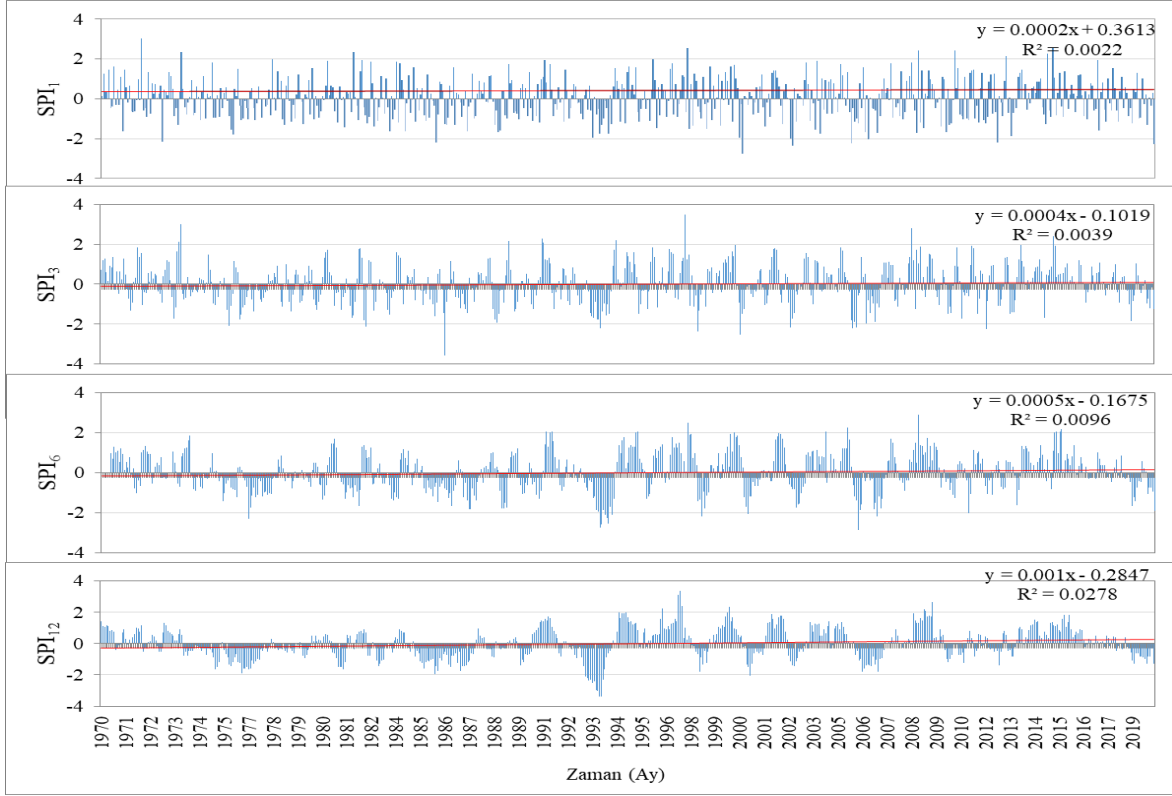
Bartın ilinde 1970-2020 yılları arasındaki 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemlerdeki meteorolojik kuraklıklar, SPI, SPEI ve SPTI indeks yöntemleriyle hesaplanmıştır. Bu dönemlere ait SPI, SPEI ve SPTI indislerinin gidiş eğrileri ve doğrusal kuraklık eğilimleri sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te gösterilmektedir.

Şekil 3, 4 ve 5'te SPI, SPEI ve SPTI indislerinin gidiş eğrilerine genel olarak bakıldığında kuraklık olaylarının 1994 yılından önceki zaman dilimlerinde daha hakim olduğu bu yıldan sonra ise nemli dönemlerin daha baskın olarak meydana geldiği görülmektedir. Farklı zaman dilimlerindeki SPI, SPEI ve SPTI indekslerinin gidiş eğrileri birlikte incelendiğinde, 1 aylık yağış, evapotranspirasyon ve sıcaklıklara bağlı meteorolojik kuraklıkların değişken olduğu ve özellikle 1993-1994 yıllarında kurak bir periyot yaşandığı görülmektedir. 3 aylık zaman dilimindeki kuraklık süreleri incelendiğinde, 1 aylık döneme ek olarak 1976-1978 ve 2006-2007 yılları arasında da kurak periyotların meydana geldiği görülmektedir. İncelenen zaman dilimi 6 ay olarak alındığında Bartın ilinde meydana gelen kurak süreçlerinin süresi ve şiddetinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. 1 ve 3 aylık zaman dilimlerinde gözlenmeyen 1974-1978, 1985-1987, 1997-1998, 2000-2001, 2009 ve 2017-2019 yılları arasında kuraklık süreçlerinin meydana geldiği görülmektedir. 12 aylık zaman diliminde ise Bartın ilinde 1970-2020 yılları arasında meydana gelen kurak süreçler daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. 12 aylık zaman dilimlerinde meydana gelen kurak süreçler ve bu süreçlerin karakteristik özellikleri SPI, SPEI ve SPTI gidiş eğrileri kullanılarak run analizi ile değerlendirilip Bölüm 3.2'de detaylı olarak verilmiştir.

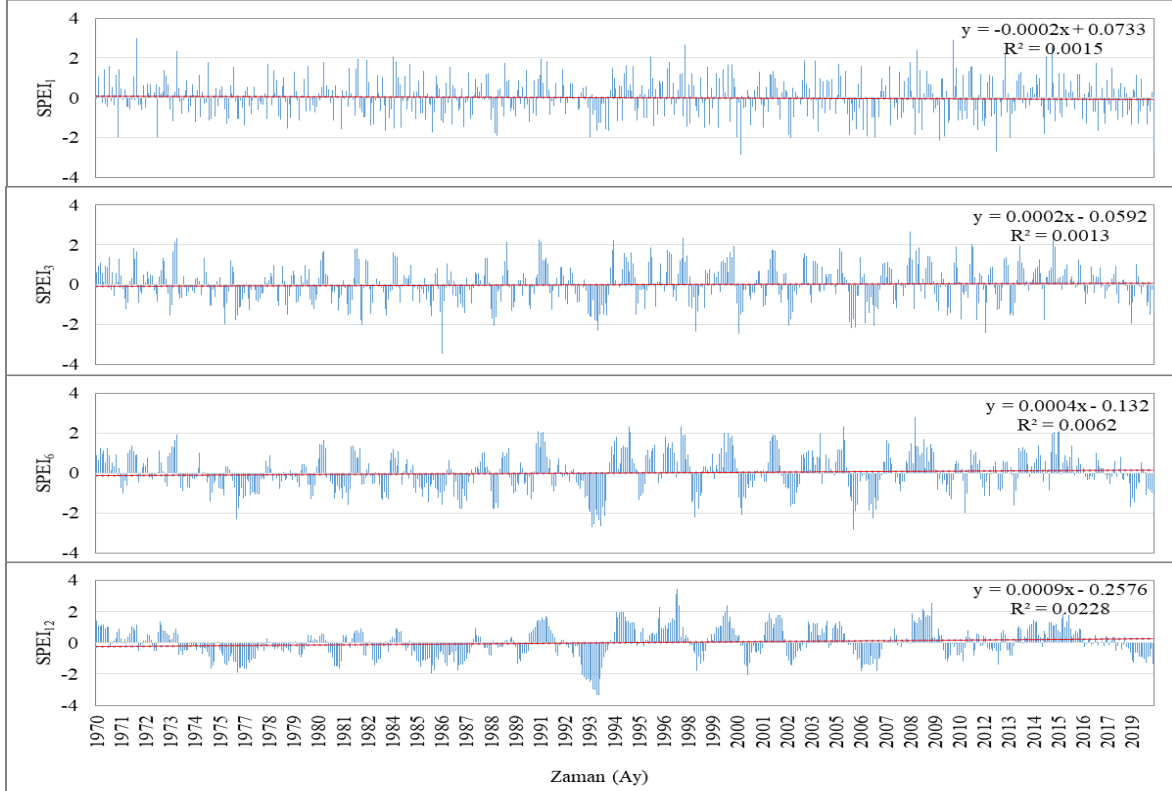
Bartın ili 1970-2020 yılları arası SPI, SPEI ve SPTI 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimlerindeki gidiş eğrilerinden elde edilen kuraklık olaylarının kuraklık sınıflarına göre görülme sıklıkları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3'te verilen Bartın ili 1970-2020 yılları arasında kısa (1 ve 3 aylık) ve uzun (6 ve 12 aylık) dönemde meydana gelen kuraklık olayları beraber incelendiğinde kısa dönem kuraklıklarda nemlilik ve kuraklık olaylarının dengeli olduğu görülmektedir. Ancak uzun dönem kuraklıklarda kuraklık olaylarının daha sıklıkla meydana geldiği görülmektedir. Bartın ilinde incelenen zaman dilimlerinde kısa ve uzun dönemlerde meydana gelen kuraklık olayları HŞK sınıfında meydana gelmiştir. ÇŞK sınıfı 1 aylık zaman diliminde daha az meydana gelirken 12 aylık zaman diliminde doğru gidildikçe daha fazla sayıda yaşanmıştır. Tablo 3'te verilen 1 aylık zaman dilimlerinde en fazla ÇŞK sınıfı 11 adet olay ile SPTI yönteminde belirlendiği görülmektedir. SPI yönteminde 8 defa SPEI yönteminde ise 6 defa kuraklık olayları ÇŞK sınıfında meydana geldiği belirlenmiştir. İndeks yöntemlerinin hepsinde Ocak.2001, Haziran.2003, Mayıs.2013 ve Aralık.2020 aylarında kuraklık ÇŞK sınıfında meydana geldiğini göstermiştir. Bu ayların yanında SPI yöntemi Aralık.1972, Mart.1986, Nisan.2006 ve Şubat 2007 aylarının, SPEI yöntem Ağustos.2010 ve Ocak.2014 aylarının ve SPTI yöntemi Aralık.1972, Mart.1986, Nisan.2006, Şubat 2007 ve Ocak.2014 aylarında kuraklık olaylarının ÇŞK sınıfında gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Tablo 3'te verilen 3 aylık zaman dilimlerinde en fazla ÇŞK sınıfı 11 adet olay ile SPEI ve SPTI yönteminde belirlendiği görülmektedir. SPI yönteminde 10 adet kuraklık olayı ÇŞK sınıfında meydana geldiği belirlenmiştir.

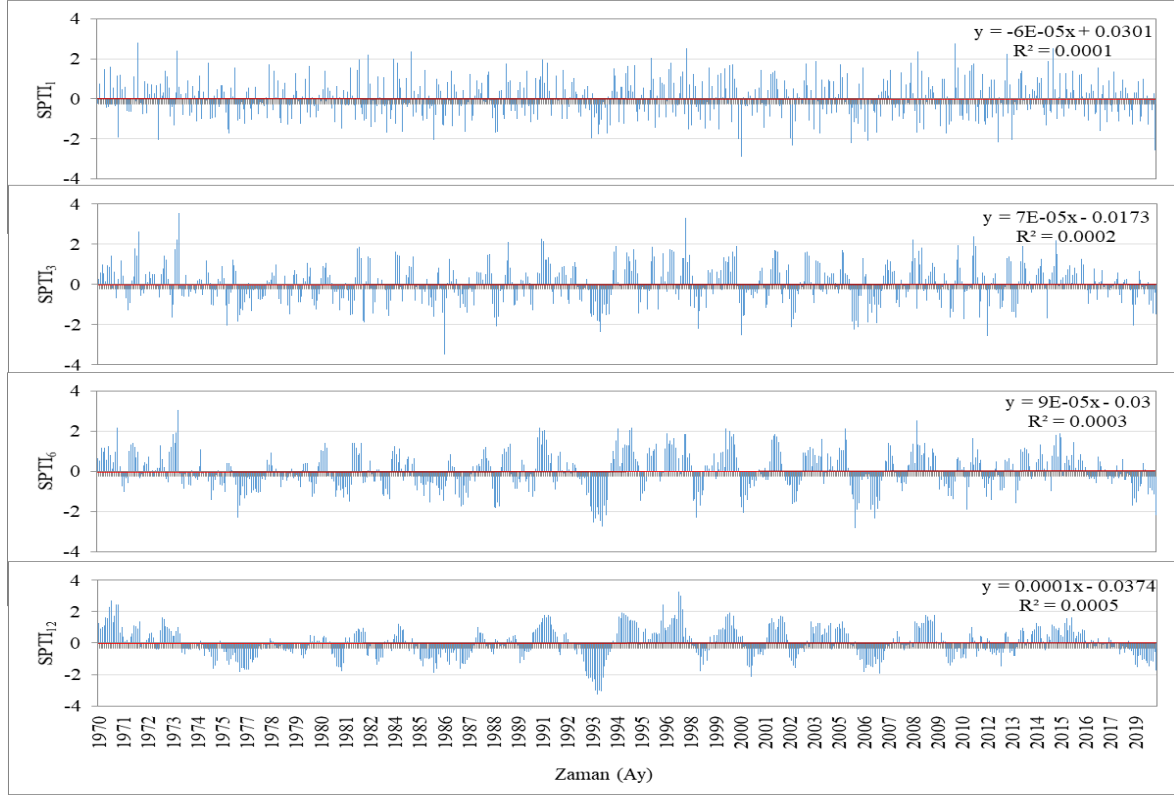
1970-2020 yılları arasındaki 3 aylık zaman dilimlerinde indeks yöntemleri Ekim.1986, Nisan.1994, Aralık.1998, Ocak.2001, Haziran.2003, Haziran.2006, Ağustos.2006 ve Kasım.2012 aylarında Bartın ilinin kuraklıkların ÇŞK sınıfında yaşandığını belirlemişlerdir. Bunlara ek olarak SPI, Mayıs.1976 ve Aralık.1982 aylarının, SPEI, Aralık.1982, Nisan.1989 ve Temmuz.2007 aylarının ve SPTI, Mayıs.1976 ayında da kuraklıkların ÇŞK sınıfında gerçekleştiğini belirlemiştir. Tablo 3'te verilen 6 aylık zaman dilimlerinde en fazla ÇŞK sınıfı 12 adet olay ile SPI ve SPTI yönteminde belirlendiği görülmektedir. SPEI yönteminde 11 adet kuraklık olayı ÇŞK sınıfında meydana geldiği belirlenmiştir. SPI, SPEI ve SPTI indeks yöntemlerinin hepsi Şubat.1977, Şubat - Mart.1994, Mayıs - Haziran - Temmuz.1994, Ağustos.1994, Ocak.1999, Nisan.2001, Ağustos.2006, Temmuz.2007 aylarında kuraklık olaylarının ÇŞK sınıfından gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Bu aylara ek olarak SPEI indeksi Aralık.2011 ve SPTI yöntemi Aralık.2020 aylarındaki kuraklık olaylarının da ÇŞK sınıfında geçtiğini belirtmiştir. Tablo 3'te verilen 12 aylık zaman dilimlerinde en fazla ÇŞK sınıfı 12 adet olay ile SPI ve SPEI yönteminde belirlendiği görülmektedir. SPTI yönteminde 11 adet kuraklık olayı ÇŞK sınıfında meydana geldiği belirlenmiştir. SPI ve SPEI indeksleri Aralık.1993-Ekim.1994 tarihleri arasındaki aylarda kurak olaylarının ÇŞK sınıfında geçtiği belirlerken SPTI yöntemi ÇŞK sınıfındaki kuraklık olaylarının 1 ay gecikme ile başladığını yani Ocak.1994 ile Ekim.1994 ayları arasında meydana geldiğini belirlemiştir. Bu dönemlere ek olarak yine tüm yöntemler Ekim.2001 ayındaki kuraklık olayının da ÇŞK sınıfında geçtiğini belirtmişlerdir.



Şekil 3. Bartın ilinin 1970-2020 yılları arasındaki 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemlere ait SPI indislerinin eğrileri ve doğrusal kuraklık eğilimleri.



Şekil 4. Bartın ilinin 1970-2020 yılları arasındaki 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemlere ait SPEI indislerinin eğrileri ve doğrusal kuraklık eğilimleri.



Şekil 5. Bartın ilinin 1970-2020 yılları arasındaki 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemlere ait SPTI indislerinin eğrileri ve doğrusal kuraklık eğilimleri.

Tablo 3. Bartın ili 1970-2020 yılları arası SPI, SPEI ve SPTI 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimlerindeki gidiş eğrilerinden elde edilen kuraklık olaylarının kuraklık sınıflarına göre yüzdesel görülme sıklıkları

Kuraklık Sınıfları	1 aylık			3 aylık			6 aylık			12 aylık		
	SPI	SPEI	SPTI	SPI	SPEI	SPTI	SPI	SPEI	SPTI	SPI	SPEI	SPTI
NEMLİ	311	305	306	302	306	303	299	293	293	292	295	295
HŞK	202	211	208	212	207	211	212	221	223	216	210	212
OŞK	69	61	65	62	58	57	59	55	52	64	65	59
ŞK	22	29	24	24	28	28	25	27	27	17	19	24
ÇŞK	8	6	9	10	11	11	12	11	12	12	12	11

SPI, SPEI ve SPTI gidiş eğrilerinin 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimlerindeki indis değerlerinin yüzdesel olarak belirtilen doğrusal eğilim değerleri **Tablo 4**'te verilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde, Bartın ili 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimlerindeki meteorolojik kuraklıklarının sadece 1 aylık zaman dilimleri için hesaplanan SPEI ve SPTI indislerindeki kurak olaylar yönünde doğrusal eğilimde olduğu ancak diğer tüm zaman dilimlerinde ve indekslerde gidişlerinin nemli olaylar yönünde doğrusal eğilimde olduğu görülmektedir.

Tablo 4. SPI, SPEI ve SPTI gidiş eğrilerinin 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimlerindeki indis değerlerinin yüzdesel olarak belirtilen doğrusal eğilimleri

	1 ay	3 ay	6 ay	12 ay
SPI	%0.02	%0.04	%0.05	%0.10
SPEI	% -0.02	%0.02	%0.04	%0.09
SPTI	% -0.01	%0.01	%0.01	%0.01

3.2 Bartın ili meteorolojik kuraklıkların karakteristik özellikleri

Bartın ilinin 1970-2020 yılları arasında farklı standartlaştırılmış indeks yöntemleri ile hesaplanan 12 aylık zaman diliminde meydana gelen kuraklıkların karakteristik özellikleri run analizi ile edilmiştir. İlgili sonuçlar SPI yöntemi için **Tablo 5**'te, SPEI yöntemi için **Tablo 6**'da ve SPTI yöntemi için **Tablo 7**'de verilmiştir.

Tablo 5'te yer alan SPI indisleri kullanılarak yapılan run analizi sonucunda Bartın ilinde 1970-2020 yılları arasında 13 farklı kurak periyot meydana gelmiştir. En uzun kurak dönem Kasım.1985 yılında başlamış 35 ay sürerek Eylül.1988 yılında tamamlanmıştır. Bu kurak periyot 37.14 şiddetinde ve 1.06 yoğunluğunda gerçekleşmiştir. İkinci en uzun dönem Şubat.1993 ile Mart.1995 yılları arasında 26 ay boyunca meydana gelmiştir. Kurak dönem süre bakımından ikincil olsa da 37.83 şiddeti ile ve 1.45 yoğunluğu ile en

şiddetli ve en yoğun olarak yaşanmış kurak periyodu göstermektedir.

Tablo 5. Bartın istasyonu SPI indislerine göre kurak dönemlerin karakteristik özellikleri

Başlangıç	Bitiş	Süre	Şiddet	Yoğunluk
Kas.74	Ara.78	50	39.2	0.78
Ara.81	Tem.82	8	9.48	1.19
Ara.83	Tem.84	8	6.45	0.81
Kas.85	Eyl.88	35	37.14	1.06
Eki.90	May.91	8	6.44	0.80
Şub.93	Mar.95	26	37.83	1.45
Oca.99	Eki.99	10	7.69	0.77
Haz.01	Haz.02	13	10.05	0.77
Ağu.03	May.04	10	8.40	0.84
Eki.06	Şub.08	17	19.63	1.15
Oca.11	Oca.12	13	8.13	0.63
Şub.13	Eyl.13	8	4.11	0.51
Eyl.19	Ara.20	16	12.89	0.81

Tablo 6'da yer alan SPEI indisleri kullanılarak yapılan run analizi sonucunda Bartın ilinde 1970-2020 yılları arasında 13 farklı kurak periyot meydana gelmiştir. En uzun kurak dönem SPI indis yönteminde olduğu gibi Kasım.1985 yılında başlamış 35 ay sürerek Eylül.1988 yılında tamamlanmıştır. Bu kurak periyot 32.21 şiddetinde ve 0.92 yoğunluğunda gerçekleşmiştir. İkinci en uzun dönem Haziran.1993 ile Mart.1995 yılları arasında 22 ay boyunca meydana gelmiştir. Kurak dönem süre bakımından ikincil olsa da 35.08 şiddeti ile ve 1.59 yoğunluğu ile en şiddetli ve en yoğun olarak yaşanmış kurak periyodu göstermektedir.

Tablo 6. Bartın istasyonu SPEI indislerine göre kurak dönem Run analizleri

Başlangıç	Bitiş	Süre	Şiddet	Yoğunluk
Kas.75	Ara.78	38	32.62	0.86
Ara.81	Tem.82	8	9.92	1.24
Oca.84	May.84	5	5.39	1.07
Kas.85	Eyl.88	35	32.21	0.92
Eki.90	May.91	8	5.43	0.68
Haz.93	Mar.95	22	35.08	1.59
Oca.99	Eki.99	10	7.93	0.79
Haz.01	Haz.02	13	11.52	0.89
Ağu.03	May.04	10	8.12	0.81
Eki.06	May.08	20	20.84	1.04
Oca.11	Oca.12	13	10.79	0.83
Şub.13	Eyl.13	8	5.86	0.73
Eyl.19	Ara.20	16	16.85	1.05

Tablo 7'de yer alan SPTI indisleri kullanılarak yapılan run analizi sonucunda Bartın ilinde 1970-2020 yılları arasında 13 farklı kurak periyot meydana gelmiştir. En uzun kurak dönem diğer indis yönteminde olduğu gibi Kasım.1985 yılında başlamış 35 ay sürerek Eylül.1988 yılında tamamlanmıştır. Bu kurak periyot 36.61 şiddetinde ve 1.05 yoğunluğunda gerçekleşmiştir. İkinci en uzun dönem Şubat.1993 ile Mart.1995 yılları arasında 26 ay boyunca meydana gelmiştir. Kurak dönem süre bakımından ikincil olsa da 37.40 şiddeti ile ve 1.43 yoğunluğu ile en şiddetli ve en yoğun olarak yaşanmış kurak periyodu göstermektedir.

Tablo 7. Bartın istasyonu SPTI indislerine göre kurak dönem run analizleri

Başlangıç	Bitiş	Süre	Şiddet	Yoğunluk
Kas.75	Ara.78	38	34.51	0,91
Ara.81	Tem.82	8	9.56	1,20
Ara.83	Tem.84	8	6.31	0,79
Kas.85	Eyl.88	35	36.61	1,05
Eki.90	May.91	8	6.34	0,79
Şub.93	Mar.95	26	37.40	1,43
Oca.99	Eki.99	10	7.75	0,77
Haz.01	Haz.02	13	10.24	0,79
Ağu.03	May.04	10	8.39	0,84
Eki.06	Şub.08	17	19.78	1,16
Oca.11	Oca.12	13	8.53	0,66
Şub.13	Eyl.13	8	4.36	0,55
Eyl.19	Ara.20	16	13.44	0,84

4 Sonuçlar

Sunulan çalışmada Bartın ilin 1970-2020 yılları arası kısa ve uzun dönem meteorolojik kuraklıkları SPI, SPEI ve SPTI indis yöntemleri ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında indeks yöntemlerinde elde edilen kuraklık gidiş eğrileri ile kuraklıkların doğrusal eğilimleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca SPI, SPEI ve SPTI indisleri ile elde edilen kuraklık olayların sınıfları belirlenmiştir. SPI, SPEI ve SPTI indisleri run analizine tabi tutularak 12 aylık zaman dilimlerinde meydana gelen kurak periyotlar ve bu kurak süreçlerin karakteristik özellikleri tanımlanmıştır.

Bartın ili 1970-2020 yılları arasındaki farklı dilimlerinde meydana gelen tüm kuraklık olaylarında kuraklık sınıflarının hepsi meydana gelmiştir. 1 aylık zaman diliminden 12 aylık zaman dilimine doğru gidildiğinde Bartın ilinde tüm indeks yöntemlerinde Yıldız Bozkurt (2021) çalışmasının Bartın ili için olan kısmına benzer şekilde ve Yüce ve ark. (2022) Samsun ili için yapılmış çalışmaya benzer olarak nemlilik olaylarının azaldığını ve ÇŞK sınıfında kuraklık olaylarının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca ÇŞK sınıfında yer alan kuraklık olaylarının çok büyük bir kısmının 2001 yılından sonra meydana gelen kuraklık olaylarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Uzun dönem zaman dilimi olan 6 ve 12 aylık kuraklıklarda 1994 yılının neredeyse tamamının ÇŞK sınıfında meydana geldiği görülmüştür.

SPI, SPEI ve SPTI indeksli ile elde edilen kurak gidiş eğrilerinin doğrusal eğilimleri genel olarak nemli olaylara doğrudur (1 aylık SPEI ve SPTI hariç).

SPI, SPEI ve SPTI indis yöntemlerinin run analizi sonucunda elde edilen karakteristik özelliklere göre, Bartın ilinin Yıldız Bozkurt (2021) çalışmasına benzer şekilde Kasım 1985 ile Eylül 1988 tarihleri arasındaki 35 aylık süreyi kurak bir dönem geçirdiği görülmektedir. Bartın ilindeki kuraklık karakteristiklerinden, en yoğun kuraklıkların evapotranspirasyon kayıplarından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Çalışmada 12 aylık zaman diliminde en uzun kurak dönem SPI, SPEI ve SPTI indis yöntemlerine göre Kasım.1985 ile Eylül 1988 yılları arasında 35 ay boyunca meydana gelmiştir. Elde edilen bu dönem Yıldız Bozkurt (2021) çalışmasında 12 aylık zaman dilimi için belirttiği kurak dönemle birebir uyumludur. Bartın ili, Kumanlioğlu (2020) yılında Gediz Havzası için yaptığı çalışmada belirttiği kurak dönemlere benzer şekilde, Bartın ili de 1984-1995 yılları arasında yoğun kurak dönemler yaşamıştır.

Sonuç olarak, Bartın ili zemin nemi açığını oluşturan evapotranspirasyon kaynaklı meteorolojik kuraklıklardan daha fazla etkilenmektedir. Sürdürülebilir su kaynakları yöntemi açısından bu tür kayıpların önlenmesi için Bartın iline özel bu tür çalışmaların artması gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] United Nations Convention to Combat Desertification, Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa U.N. Doc. A/AC.24/27, 33 I.L.M. 1328, United Nations, 1994.
- [2] A. A. Kumanlioğlu ve O. Fıstıkoğlu, Yukarı Gediz havzası yağışlarının meteorolojik kuraklık analizleri, DEUFMD, 21(62), 509-523, 2019. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216216>
- [3] A. A. Kumanlioğlu, Characterizing meteorological and hydrological droughts: A case study of the Gediz River Basin, Turkey., 27, e1857, 2019. <https://doi.org/10.1002/met.1857>
- [4] A. Ü. Kömüşçü, A. Erkan, E. Turgu, Normalleştirilmiş yağış indeksi metodu ile Türkiye'de kuraklık oluşumunun coğrafik analizi, DMİ Genel Müdürlüğü Araştırma ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı Yayını, Ankara, 2002
- [5] T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist, et al., The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th conference on applied climatology, 17, 179-183, 1993.
- [6] S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno, A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index J. Clim., 23(7), 1696-1718, 2010. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- [7] Z. Ali, I. Hussain, M. Faisal, H.M. Nazir, M. Abd-el Moemen, T. Hussain, S. Shamsuddin, A novel multi-scalar drought index for monitoring drought: the standardized precipitation temperature index. Water Resour. Manag., 31(15), 4957-4969, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1788-1>
- [8] Z. Ali, I. Hussain, M. Faisal, M. et al., A novel multi-scalar drought index for monitoring drought: The standardized precipitation temperature index. Water Resources Management 31, 4957-4969 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1788-1>
- [9] A. A. Kumanlioglu, A new approach for characterization of meteorological and hydrological droughts: Cumulative standardized drought index (CSDI). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 131, 103420, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103420>
- [10] S. Karaman, Z. Gökalp. Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkileri. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, 3 (1), 59-66, 2010.
- [11] N. Salehnia, A. Alizadeh, H. Sanaeinejad, M. Bannayan, A. Zarrin, G. Hoogenboom, Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data. Journal of Arid Land, 9(6): 797-809, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0070-y>
- [12] Y. Kayam, G. B. Aydın. İklim değişikliğinin Aydın yöresinde toprak nemi üzerindeki etkileri ve SWAP modeli ile simülasyonu. Toprak Su Dergisi, Özel Sayı, 31-45, 2017
- [13] M. N. Lorenzo, H. Pereira, I. Alvarez ve J. M. Diaz, Standardized precipitation index (SPI) evolution over the Iberian Peninsula during the 21st century. Atmospheric Research, 197,107132, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107132>
- [14] T. V. Le, Y. A. Liou ve K. A., Nguyen, Revealing the intricate relationship: Droughts and typhoons in Taiwan using Standardized Precipitation Index (SPI), Journal of Hydrology: Regional Studies, 55, 101917, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101917>
- [15] M. A. Khan, M. Faisal, M. Z. Hashmi, A. Nazeer, Z. Ali ve I., Hussain, Modeling drought duration and severity using two-dimensional copula. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 214, 105530, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105530>
- [16] B. Durmuş ve İ. Bulut, Batı Akdeniz'deki ekstrem kuraklık şartlarının SPEI yöntemi ile belirlenmesi. Türk Coğrafya Dergisi, 84, 41-52, 2023. <https://doi.org/10.17211/tcd.1327588>
- [17] Y. D. Öztürk ve R. Ünlü, Karadeniz Bölgesi kurak ve nemli dönemlerin SPI yöntemi kullanılarak belirlenmesi. Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 10(2), 247-262, 2024. <https://doi.org/10.21324/dacd.1383857>
- [18] S. Yıldız Bozkurt. Karadeniz Bölgesindeki tarihsel meteorolojik kuraklıkların farklı yöntemlerle değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye, 2021.

- [19] M. İ. Yüce, H. Aksoy, A. Aytek, M. Eşit, F. Uğur, İ. Yaşa, A. Şimşek, İ. H. Değer. SOI ve SPEI ile Samsun ili kuraklık analizi. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(3), 285-295, 2022. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1108663>
- [20] T. Partal, E. Yavuz. Batı Karadeniz Bölgesinde kuraklık indisleri üzerinde trend analizi. Artvin Çoruh Üniversitesi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6(2), 345-353, 2020. DOI: 10.21324/dacd.643161
- [21] E. Gül, ve ark.. Batı Karadeniz Havzası Taşkın Yönetim Planı. Ankara, 2019, 821s.
- [22] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Bartın İl Kültür Turizm Müdürlüğü <https://bartin.ktb.gov.tr/TR-68966/iklim.html> Erişim tarihi: 18.Aralık.2024
- [23] E. Baş, Ş. Palta, İ. C. İpek. Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Bartın ilinin Thornthwaite ve Köppen yöntemlerine göre iklim sınıflandırması. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 26 (4), 329-344, 2024. DOI: 10.24011/barofd.1484677
- [24] T. B. McKee, N. J. Doesken ve J.Kleist, The Relationship of drought frequency and duration to time scales. (th Conference on Applied Climatology, sayfa 1-6, Anaheim, California, 17-22 January 1993.
- [25] World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP)-Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva, 2016.
- [26] S. M., Vicente-Serrano, S. Begueria, J. I. Lopez-Moreno, A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. J. Clim. 23, 1696-1718, 2010. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- [27] V. Yevjevich, An objective approach to definition and investigations of continental hydrologic drought. In: Hydrology paper, n.23, Colorado State University, Colorado, 1967.





Taxonomy of sensor fusion techniques for various application areas: A review

Çeşitli uygulama alanları için sensör füzyon tekniklerinin taksonomisi: Bir inceleme

Hande Çavşı Zaim^{1,*} , Esra N. Yolaçan² 

^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Department of Computer Engineering, 26040 Eskişehir, Türkiye

Abstract

Sensor fusion techniques play critical roles in various industries such as defense, automotive, military, and healthcare. These techniques combine data from multiple sources, resulting in more detailed and reliable results. Sensor fusion techniques are indispensable for effective decision-making processes, especially in complex environments and variable conditions. These techniques allow systems to operate more efficiently. This study examines the advantages, challenges, and different algorithms used in various sensor fusion techniques and provides a comprehensive classification. This classification makes it possible to evaluate sensor fusion techniques and categorize them to appeal to broader applications. The study aims to help researchers understand sensor fusion techniques and guide them in making choices that suit their needs. Additionally, when evaluating the future potential of sensor fusion, the focus is on how fusion techniques may evolve, particularly with increasing complexity and diversity. Thus, it contributes to advancing research in sensor fusion and developing more effective systems.

Keywords: Data fusion, Information fusion, Sensor fusion, Sensor fusion algorithms, Sensor fusion taxonomy

1 Introduction

The Joint Directors of Laboratories (JDL) committee determined the definition of sensor fusion as follows: Sensor fusion or information fusion is a multi-level procedure that deals with the association, correlation, and integration of data and information from single and multiple sources to obtain distinctive locations and determine predictions [1]. When the studies in the literature are examined, it has been observed that the terms sensor fusion, information fusion, and data fusion are used interchangeably. *Information fusion techniques* combine data from multiple sensors and related databases to achieve improved accuracy and more specific definitions compared to a single sensor [2]. *Sensor fusion* is the collaborative use of information provided by multiple sensors to help perform a function [3,4]. *Data fusion* combines data from various sources to improve system performance [5-7]. Regardless of the different definitions in

Öz

Sensör füzyon teknikleri savunma, otomotiv, askeri ve sağlık gibi çeşitli endüstrilerde kritik rol oynamaktadır. Bu teknikler, birden fazla kaynaktan gelen verileri birleştirerek daha ayrıntılı ve güvenilir sonuçların elde edilmesini sağlar. Özellikle karmaşık ortamlarda ve değişken koşullarda etkili karar verme süreçleri için vazgeçilmez olan sensör füzyon teknikleri sistemlerin daha verimli çalışmasına olanak tanır. Bu çalışma, çeşitli sensör füzyon tekniklerinin avantajlarını, zorluklarını ve kullanılan farklı algoritmaları detaylı bir şekilde incelemekte ve kapsamlı bir sınıflandırma sunmaktadır. Bu sınıflandırma, çeşitli sensör füzyon tekniklerini değerlendirmeyi ve bunları daha geniş bir uygulama alanına hitap edecek şekilde kategorilere ayırmayı mümkün kılar. Çalışmanın amacı araştırmacılara sensör füzyon tekniklerini daha iyi anlamalarını sağlamak ve ihtiyaçlarına uygun seçimler yapmaları için rehberlik etmektir. Ayrıca, sensör füzyonunun gelecekteki potansiyeli değerlendirilirken, özellikle artan karmaşıklık ve çeşitlilikle birlikte füzyon tekniklerinin nasıl gelişebileceğine değinilmiştir. Böylece sensör füzyonunda araştırmaların ilerlemesine ve daha etkili sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlanır.

Anahtar kelimeler: Bilgi füzyonu, Sensör füzyonu, Sensör füzyonu algoritmaları, Sensör füzyonu taksonomisi, Veri füzyonu.

the literature, sensor fusion can be summarised as integrating information from multiple sources to increase the accuracy and quality of the content and reduce cost.

Sensor fusion technology plays a critical role in many industries, such as automation, robotics, and artificial intelligence. This technology integrates data from different sources, enabling more comprehensive, reliable and in-depth analysis. In this way, correct and timely decisions can be made in complex environments and changing conditions, system performance can be increased, and innovative solutions can be developed. Sensor fusion has a wide range of applications, from industrial processes to healthcare, defence technologies, and environmental monitoring systems. Sensor fusion techniques direct future technological developments by providing advanced data integration and analytics in these areas.

The advantages of sensor fusion techniques can be listed as 1) reduction in uncertainty, 2) increase in accuracy, and 3)

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: handecavsi43@gmail.com (H. Çavşı Zaim)
Geliş / Recieved: 19.03.2024 Kabul / Accepted: 02.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1455086

cost reduction [8]. Sensor fusion techniques can be considered the most suitable method for achieving a certain level of accuracy in integrating multiple sensors, as the inadequacy of data from a single sensor can be compensated for by data from other sensors.

Sensor fusion applications can effectively solve many problems in various areas. The main areas where sensor fusion applications are used include the Internet of Things (IoT), automotive and navigation, quadrotors and drones, computer vision, virtual reality/augmented reality, and healthcare [9].

Sensor fusion helps provide context awareness of IoT. Context awareness is the ability of a system or device to detect environmental conditions, user situations, or contexts of interaction. Sensor fusion provides more comprehensive and reliable information by combining data from different sensors, thus enabling systems and devices to detect interaction contexts more accurately and quickly. The number of IoT devices and the data types they collect are increasing daily, making sensor fusion techniques even more critical. For example, sensor fusion techniques are needed in IoT fields such as smart energy consumption control [10], power grid [11], management, environmental monitoring, industrial [12], and home automation [13]. A sensor-equipped car can monitor traffic anywhere in the city due to a camera feeding on the road, and it uses IoT sensor fusion techniques to transmit this information as feedback to the user [14,15]. Sensor fusion techniques increase the efficiency of these applications and enable the development of more intelligent and predictive systems.

Data security and privacy from IoT devices are critical for the effectiveness and reliability of sensor fusion techniques. Because these techniques aim to achieve more robust and comprehensive results by integrating these data. In this context, Ding et al. [16] classified IoT applications in various fields and proposed data integration requirements regarding the security and privacy of IoT data.

Various sensors, such as a Global Positioning System (GPS), LiDAR, and ultrasound, are used in automotive and navigation applications, where sensor fusion techniques provide effective solutions. For an autonomous driving task, data from these sensors can be combined to provide a complete view of the driving condition. While LiDAR sensors offer better coverage, they do not provide velocity information, and RADAR provides accurate velocity data but is ineffective on winding lanes. In this context, sensor fusion techniques are applied to avoid collisions, mainly to prevent false positive cases and to improve the detection quality [17].

The quadrotor navigation system usually has a complementary sensor group consisting of a three-axis gyroscope, a three-axis accelerometer, a magnetometer, a pressure altimeter, ultrasonic sensors, and GPS [18]. In this type of quadrotor and drone applications, sensor fusion techniques are applied to avoid compromising the operation if a sensor input is missing. Due to the sensor fusion technique, reliability and operational continuity are ensured.

Sensor fusion techniques enable the detection of environmental information with increased sensitivity and

accuracy in computer vision applications. A computer vision study that emulates human vision using competing sensors has demonstrated this capability [19]. Additionally, sensor fusion techniques are needed in situations such as combining infrared images and multiple images with different exposures [20] or automatically scanning bags and belongings for security purposes in places such as stadiums and museums [21].

Accurately tracking head movements is a significant challenge in Virtual Reality (VR) applications. Virtual objects must be aligned with the natural world as users move their heads. In this case, a single gyroscope or accelerometer alone is not enough. VR systems overcome this challenge by using sensor fusion techniques that combine data from sensors such as gyroscopes and accelerometers. The gyroscope reduces noise in short-term movements, while the accelerometer provides long-term stability [22].

Sensor fusion techniques used in healthcare can be used for applications such as monitoring the health status of older adults and evaluating body postures in babies [23,24]. These applications use body and wireless sensor networks to fusion data from various sensors for human tracking [25], identification [26], and monitoring patients' mental states [27]. With sensor fusion techniques, the reliability of measurements is increased and false favourable rates are reduced.

Sensor fusion techniques are complex processes involving integrating data from multiple sources. Therefore, although they provide advantages and convenience in complex applications, they include challenges in implementation [28]. These challenges can be listed as 1) different operating principles of different sensors, 2) data inconsistency or errors, 3) time synchronisation, 4) high computational power requirement, 5) accuracy and reliability. Sensors with different operating principles produce various types of data. Harmonising and combining this data is a significant challenge. Although inherently sensitive, sensors can sometimes cause data loss and erroneous or noisy data. This situation is a considerable challenge to obtaining accurate results. Effective data integration from various sensors necessitates time synchronisation—a lack of synchronisation results in data being combined or misinterpreted. Sensor fusion techniques require high computational power, especially in real-time applications. This situation is a significant challenge regarding processor power or memory usage. Most sensors generate a signal through several transformation steps. Therefore, the user's output may differ from the actual input. These performance-related parameters or specifications indicate rates of deviation from ideal behaviour. While static properties such as accuracy, precision, resolution, and sensitivity can be easily managed before the fusion process, dynamic properties vary between different inputs. Therefore, there may be deviations and errors in the required information. Errors are sometimes caused by random noise and sometimes by a systematic error related to time. If the error is known, it can be fixed by a defined filter. As a result, obtaining precise and reliable results due to sensor fusion is a considerable challenge. Appropriate sensor fusion

techniques must be used to overcome this challenge, and the system must be constantly calibrated. The existing literature's taxonomy is often limited to specific application areas or sensor types, making it difficult for researchers and engineers to obtain the comprehensive perspective they need. This study presents a comprehensive taxonomy of sensor fusion techniques used in complex applications, aiming to help researchers who want to work in this field choose the appropriate technique for their needs. The contributions of the study are as follows:

- The study discusses the importance of sensor fusion, its working principles, different techniques, advantages, challenges, and application areas.
- A comprehensive taxonomy of sensor fusion techniques is presented. This taxonomy allows the classification of various sensor fusion techniques, providing researchers with a comprehensive perspective on choosing the appropriate method.
- The study examines the algorithms used in sensor fusion techniques available in the literature and presents these algorithm's descriptions and mathematical formulas.

The second chapter of the study presents the general taxonomy of sensor fusion techniques. The third section presents current algorithms used in sensor fusion techniques and their application areas. The fourth section discusses the current status of sensor fusion techniques, the reasons for their preference, and offers suggestions for future sensor fusion studies.

2 Sensor fusion taxonomy

There are multiple approaches in the literature regarding the taxonomy of sensor fusion techniques. In this section, existing sensor fusion techniques are examined in detail, and a comprehensive taxonomy is created. This taxonomy makes it possible to evaluate a wide range of sensor fusion techniques and categorise them to appeal to a broader application area. Elmenreich [29] has defined three basic ways of combining sensor data: competitive, complementary, and cooperative. In another study, sensor fusion techniques have been discussed in four primary categories [30]. These categories are classification based on the relationship between different input sources, classification based on input and output data types, classification based on the abstraction level of combined data, and classification based on the kind of fusion architecture. Another study discussed sensor fusion architectures at the decision, feature extraction, and raw data levels [31]. A survey that performed data fusion taxonomy for Wireless Sensor Networks (WSN) classified it as the relationship among the sources, levels of abstraction, input and output, data level fusion, data type fusion, and data fusion based on user requirements [32]. In addition, recent studies have categorised sensor fusion techniques as early fusion, mid/halfway fusion, and late/decision fusion [33-35].

This study examined sensor fusion taxonomies in the literature and created a new comprehensive taxonomy

containing each category. The created sensor fusion taxonomy is in Figure 1.

2.1 Relationship among the sources

The relationships among the sources are categorised as “complementary”, “redundant/competitive”, and “cooperative” as in Figure 2 [36].

Complementary fusion combines data from multiple sensor nodes to obtain more general information [37,38]. In an area where one resource is missing or weak, another strong resource complements the weak or missing one. Integrating lidar and radar sensors in autonomous vehicles is a good example of this technique [39]. Camera sensors provide image-based information and detect the colours, shapes, and details of surrounding objects with high resolution. However, its performance decreases in low light conditions or adverse weather conditions such as dense fog. Lidar sensors use laser beams to provide precise distance and shape information and can create detailed 3D maps of the environment. However, certain weather conditions, like heavy rain or snow, can affect lidar performance. When these two types of sensors are combined (complementary fusion), more comprehensive and reliable information about the vehicle's environment is obtained.

Redundant/competitive fusion: Data is combined to obtain high-quality information and eliminate unnecessary data transfer. Resources are interchangeable to achieve the same purpose or goal. There are situations where one resource becomes redundant or competes with another. GPS and Lidar sensors used in autonomous vehicles and location and environmental sensing systems are good examples of redundant/competitive fusion [40]. GPS determines the vehicle's location using signals from satellites. Lidar uses laser beams to measure the distance of surrounding objects and creates a three-dimensional map. When both systems operate simultaneously, GPS and Lidar data are constantly compared to determine which sensor provides the most reliable and accurate information about the vehicle's location and surroundings. The system determines which sensor provides more reliable information and ignores data from the other sensor when necessary.

Cooperative fusion: Data from independent sources are combined to obtain new information using angle and distance. This method aims to get a more comprehensive or accurate result by combining data from different sources. Data from different sources provide different perspectives or information about the same event or target, resulting in higher accuracy and more comprehensive determinations. Detecting and tracking pedestrians in autonomous vehicles is critical for safe driving [41]. This system applies collaborative fusion to obtain more accurate and reliable results using various sensor types. Cameras provide visual information about objects (including pedestrians) around the vehicle by capturing high-resolution video or photos. A radar sensor is not particularly affected by weather conditions and can accurately detect the velocity of moving objects. Lidar measures the distance and position of surrounding objects millimeter precision and provides a detailed 3D map of the area around those objects. Visual information from the

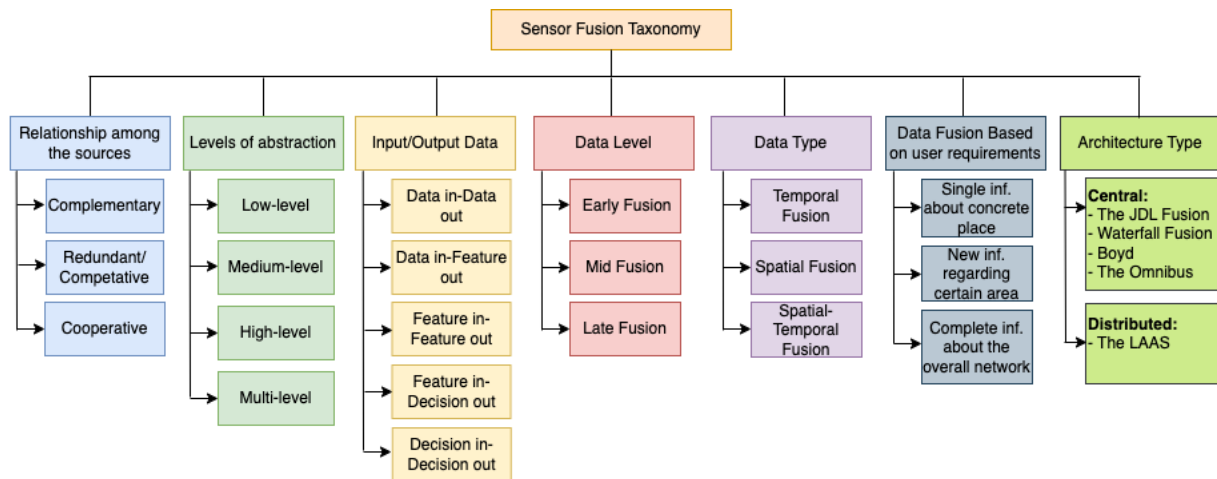


Figure 1. Sensor fusion taxonomy.

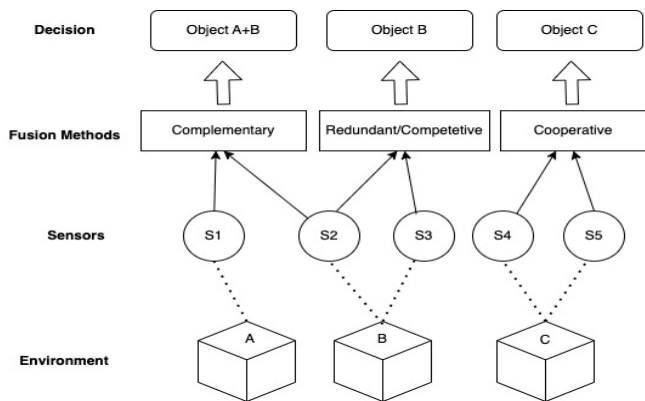


Figure 2. Complementary, redundant/competitive, cooperative fusion [29].

camera is combined with distance and velocity information from Radar and Lidar. This provides more comprehensive and accurate pedestrian detection by leveraging the strengths of each sensor. Due to this collaborative fusion, the system accurately determines pedestrians' location, distance, and velocity and monitors the environment around them in detail.

2.2 Levels of abstraction

Levels of abstraction are categorised as low-level, medium-level, high-level and multi-level [42].

Low-level fusion: Raw data is combined to reduce noise and obtain more accurate data. Each sensor alone may be incomplete or susceptible to noise. For example, in a navigation device, the magnetometer determines the general direction, while the gyroscope's data corrects the magnetometer's deviations and increases the device's stability.

Medium-level fusion: This is also called feature fusion. Features of the raw data are combined to create a feature map. Feature fusion aims to create a more comprehensive feature map by combining features of raw data from different sensors or data sources. For example, in an image processing application, a 3D feature map of an object can be created by combining the colour, depth and thermal properties of

images taken from cameras operating at different frequencies. This map is used to describe and understand various features of the object in more detail.

High-level fusion: High-level fusion, also known as decision-level fusion, involves aggregating decisions as input and amalgamating them to yield more comprehensive decisions at a global scale. For example, a security system uses facial and fingerprint recognition to verify a user's identity [43]. Analyzing the user's face generates an authentication score. Scanning the user's fingerprint generates an individual authentication score. Both systems attempt to authenticate the user independently. The two resulting verification scores (facial recognition and fingerprint) are combined (for example, using a weighted average or rules based on the combined scores). The final decision determines whether the user will be granted access. In this process, high-level fusion combines the independent decisions made by each sensor to create a more reliable authentication decision.

Multi-level fusion: In this fusion level, the input and output of the data fusion system are among the previous levels. It is when the features combined at the last level are used as input to the decision-making process at the next level. For example, a smart farming system collects data about a field using various sensors and uses this data to optimize plant health and productivity [44]. In multi-level fusion, raw data from soil moisture sensors and data from weather sensors are combined at a low level. These combined data are analyzed at the intermediate level together with plant health characteristics (e.g. NDVI from drone imagery). The results of medium-level analyses are used as input to high-level decision-making. In this process, integrating data at various levels helps the farmer make correct irrigation and fertilization decisions.

2.3 Input/Output data

There are five categories of data fusion based on data input and output [45].

Data in, data out (DAI-DAO): Within this category, the data fusion system receives raw data as input and produces more dependable raw data as output.

Data in, feature out (DAI-FEO): It involves feeding raw data into the data fusion system, yielding an extracted property or attribute, such as an object or state.

Feature in, feature out (FEI-FEO): Here, the system takes a feature as input, generates a verified feature, or extracts new features.

Feature in, decision out (FEI-DEO): In this category, a set of features serves as input to the data fusion process, resulting in decision-making outputs.

Decision in, decision out (DEI-DEO): This category encompasses scenarios in which decisions are provided as input and new decisions are generated as output through the data fusion process.

2.4 Data level

Sensor data can be combined at different levels in different applications. Three different levels of data fusion are shown in Figure 3.

Early fusion: Features from all sensors are combined into one input, and one classifier is trained on the combined feature representations. It integrates information from different methods at the feature level and requires only one classifier. It can be computationally efficient. However, it carries the risk of high input dimensionality, which can lead to overfitting and increased implementation costs. It may exhibit unusual or non-intuitive properties due to the combination of various types of information.

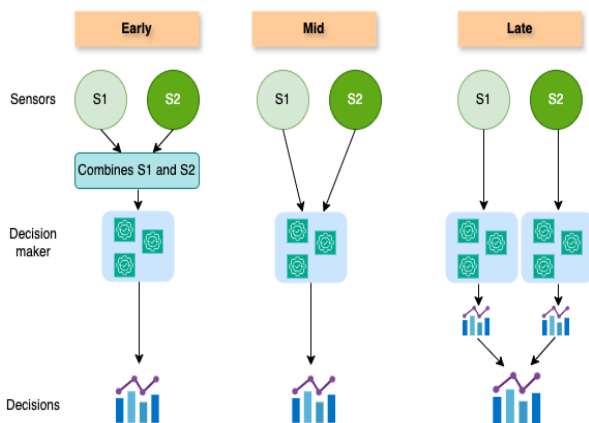


Figure 3. Data level fusion techniques [46].

Mid fusion: There is one classifier, but it is trained on a properly processed, more abstract version of the input from each modality. Extracting abstract representations from each modality requires additional processing and can be computationally costly.

Late fusion: Each modality is trained with a separate classifier that makes decisions independently, and then the decisions or predictions from the individual classifiers are combined to obtain the final classification result. This fusion allows each modality to be processed independently and can be computationally efficient. It can handle unit and scale differences between modalities. However, it involves the risk of missing complementary information in the combined feature representation. Additional processing is required to integrate the outputs of individual classifiers.

2.5 Data type

Depending on the data type, there are three types of data integration: "temporal fusion, spatial fusion, and temporal-spatial fusion" [47].

Temporal fusion means combining data from different periods but from the same source. Thus, time series data can detect changes and distortions in time and capture seasonality and trends.

Spatial fusion means combining data simultaneously but from different sources. Thus, the same event or phenomenon can be examined from various perspectives. It provides other features and offers multiple perspectives for an event identified by different sensors (such as local and satellite).

Temporal spatial fusion refers to continuously merging data from different nodes over a certain period. It is suitable for studies that require continuous data merging to obtain an instantaneous status. It can capture both changes over time and relationships in different places.

These methods can meet different data analysis and processing needs and are often used to transform extensive data sets into more meaningful and usable information.

2.6 Data fusion based on user requirements

Depending on the user's needs, there are three types of data fusion: single, new, and complete. Sometimes, the user may need a *single* piece of information about a concrete place that can be obtained with a *single* sensor or *new* information about a specific area. In addition, the user may need *complete* information about the general location or network [48]. For example, the user wants to monitor room temperature changes using data from a single sensor. In this case, the user only needs a *single* data set for a specific point. In cases where the user wants to create a new usage map by combining data obtained from satellite images and local sensors, the aim is to get *new* information by combining existing data. In another case, an urban planner may want to analyse traffic flow throughout the city and optimise the transportation system. In this case, the user aims to create a *complete* map of the city-wide transportation network by combining data from different sources.

2.7 Architecture type

This study discusses sensor fusion architecture types in two categories: central and distributed. *Central architecture* is the approach in which data from different sources is combined in a central location. The fusion process is performed on a central server or computer. *Distributed fusion architecture* is an approach in which data from different sources is combined in a distributed manner. In this approach, the fusion process is performed distributedly where resources are available.

2.7.1 Central architecture

Central fusion architecture collects data fusion and processing processes at a single central point, as in Figure 4. This architecture suits situations where data flows are collected and managed under central control. It provides data consolidation and captures an integrated perspective. Central architecture is advantageous because it is simple and

optimal. It also allows for the easy detection of erroneous reports [49].

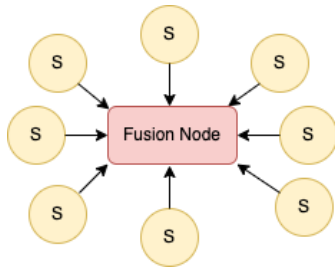


Figure 4. Central architecture.

On the other hand, this architecture needs higher bandwidth to transmit data from all sensing nodes to the central processor fusion and requires more resources for data processing [50]. One of the central models used in both military and commercial fields is JDL. JDL model includes five levels of data processing and a database, all connected by a data path [51]. The elements of the model are as follows:

Sources include various data sources such as sensors, a priori information, databases, and human input.

Source preprocessing (Level 0): This element pre-scans data and allocates it to appropriate processes, reducing the processing load of fusion processes.

Object refinement (Level 1): This level provides data alignment (data transformation into a consistent reference frame), correlation, tracking of objects' actual and future locations, and identification using classification methods.

Situation refinement (Level 2): Situation refinement attempts to contextualise the relationship between objects and observed events.

Threat refinement (Level 3): Attempts to make inferences about vulnerabilities and operational opportunities based on preliminary information and predictions.

Process refinement (Level 4): This meta-process monitors system performance (e.g., real-time constraints) and reallocates sensors and resources to achieve specific mission objectives.

Database management system: This system monitors, evaluates, adds, updates, and provides information about fusion processes.

Man-machine interaction contains an interface that transmits input and fusion results to operators and users.

The JDL model, being data or information-centric, poses challenges in extending or repurposing applications developed under its framework. Its abstract nature complicates accurately interpreting its components and their application to specific problem domains. While the model aids in establishing a common understanding, it lacks guidance for developers in selecting appropriate methodologies. JDL fusion architecture can be used in application areas such as military [52], agriculture [53] and autonomous vehicles [54].

Another central fusion architecture is waterfall architecture, as shown in Figure 5. Waterfall emphasises processing functions at lower levels [55]. The process stages of the waterfall model consist of levels 0,1,2,3. *The detection*

and signal processing level (level 0) corresponds to source preprocessing in the JDL model. *The feature extraction and pattern processing level (level 1)* matches the object refinement in the JDL model. *The situation assessment level (level 3)* matches the situation improvement level in the JDL model. *The decision level* corresponds to the threat improvement level in the JDL model. The waterfall model, which is very similar to the JDL model, has the same disadvantages. The most significant limitation of the waterfall model is that any feedback data flow is neglected. Waterfall fusion model is used in application areas such as agriculture [56], health [57] and maintenance system [58].

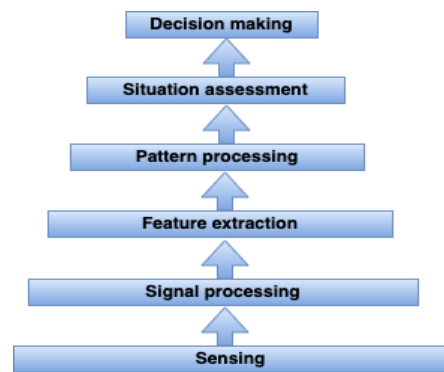


Figure 5. Waterfall model.

Another known central architecture is the Boyd model [59], which consists of a 4-stage cycle, as shown in Figure 6. The Boyd loop is used for sensor fusion because decision support systems for situational awareness are strongly related to fusion systems.

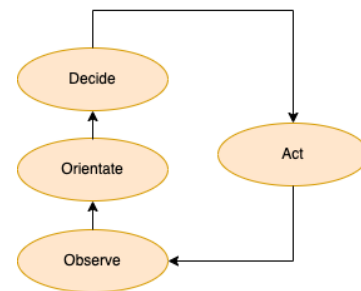


Figure 6. Boyd model.

The elements of the Boyd model are divided into four. *Observe* generally corresponds to resource preprocessing in the JDL model. *Orientate* corresponds to level 1, 2, and 3 functions of the JDL model. *Decide* is comparable to level 4 (process improvement) of the JDL model. The *act* includes implementing decisions. In this phase, decisions are translated and implemented into real-world actions. Actions are based on decisions taken to achieve predetermined goals. It has no direct equivalent in the JDL model. First used to model the military chain of command, the Boyd fusion model became widespread for data fusion.

Another central architecture similar to the Boyd model is the omnibus model in Figure 7 [60]. However, unlike the

Boyd model, the omnibus model structures the transaction levels in detail.

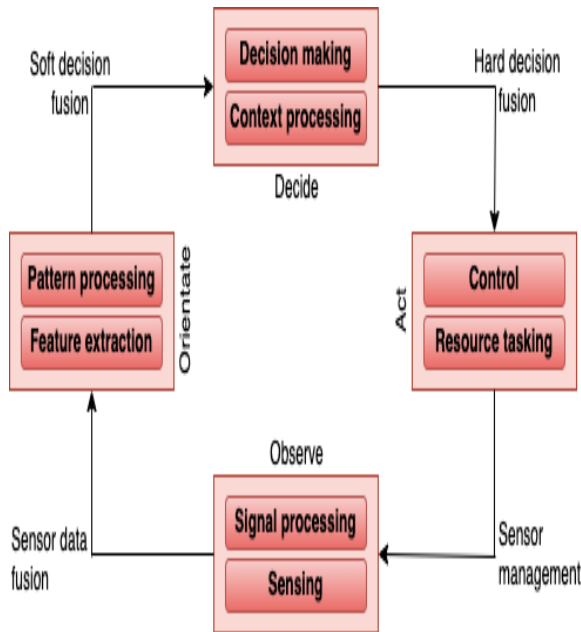


Figure 7. Omnibus model.

While the hierarchical division of sensor fusion tasks in the omnibus model is notably intricate, it cannot partition functions in a manner conducive to distributed sensing and data processing. Consequently, the model does not facilitate decomposition into modules that can be independently implemented, tested, and repurposed for diverse applications. Table 1 presents the advantages, disadvantages, and reasons for preference of the introduced central architectural fusion architectures.

Table 1. Central fusion architectures.

Model	Advantages	Disadvantages	Reason of preference
JDL	Can integrate complex data sources and processes.	High bandwidth requirements. Huge resource requirement for data processing.	It is used when integrating a wide variety of data sources is required. It has been widely accepted and used in military and commercial fields.
Waterfall	The clear and distinct separation of stages. Each stage focuses on a specific function. Simple and understandable structure.	Feedback flow is not taken into account. Lack of flexibility between stages.	It is used in applications where a simple and flat process structure is needed. It is preferred in areas such as agriculture, health and care systems.
Boyd	It is suitable for decision support systems. It provides a good structure for situational awareness. It includes a feedback mechanism between stages.	It requires high data flow and processing load under central control. It is not flexible due to its non-modular structure.	It is used in military decision-making processes. It is preferred in applications where decision and action cycles are frequent.
Omnibus	Detailed and comprehensive phase separation. Provides detailed functional structure for complex tasks. Hierarchical separation of processing levels.	Lack of separability in modular construction. High complexity and resource requirement.	It is suitable for mixed and multi-stage sensor fusion missions. It is used when modularity is unnecessary and centralised control is required.

2.7.2 Distributed architecture

Unlike a centralised architecture, a distributed architecture does not have a single central node, as in Figure 8. Nonetheless, data fusion is locally executed at every node within the network, leveraging observations obtained from adjacent nodes. Distributed architecture provides advantages in terms of supporting changes in the network, scalability and tolerance [61]. Data is sent to multiple nodes instead of a central node, reducing processing load and communication overhead. Additionally, there is less communication delay, allowing the user to access fusion results faster. One of the known distributed architectures is the Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes (LAAS) architecture [62].

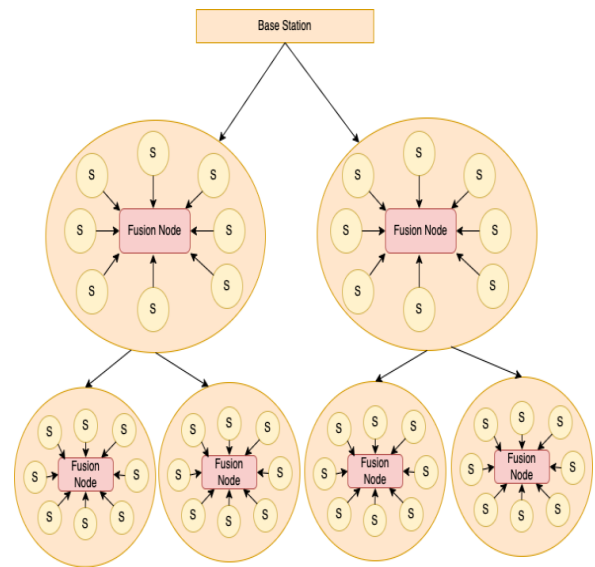


Figure 8. Distributed architecture.

LAAS has been developed as an integrated architecture for designing and implementing mobile robots in real time and for reusing code. LAAS architecture consists of four levels.

The *logical robot level* creates a hardware-independent interface between physical sensors, actuators, and the functional level.

Processing functions such as *image processing level*, obstacle avoidance, and control loops are housed in separate controllable communication modules.

Execution control level controls and coordinates the execution of functions according to mission requirements. *The decision level* includes the ability to generate the mission plan and oversee its execution, as well as react to other events at the executive control level. Depending on the application, the decision level may consist of several layers that provide different representation abstractions and have different temporal properties. While the architecture provides a suitable means of dividing large systems into modules, it does not offer real-time communication and representation of aggregated data. Centralized and distributed fusion architectures are compared in [Table 2](#).

Table 2. Central and distributed fusion architecture comparison.

Feature	Central	Distributed
Structure	Data fusion and processing is done at one central point.	Data fusion is performed locally at each node in the network.
Models	JDL, Waterfall, Boyd, Omnibus	LAAS
Advantages	It is the data management and control center. Errors can be easily detected with centralized control. Provides data integration and consolidation.	Provides support for changes in the network. It offers scalability and tolerance. Processing and communication load is reduced. Faster access and less communication delay.
Disadvantages	High bandwidth and data processing requirements. Failure of the central node affects the entire system. Lack of modular structure.	Complex management and coordination due to distributed structure. Lack of unified data representation and real-time communication.
Scalability	Low	High
Reaction time	High	Low
Data Processing Load	High	Low
Communication Payload	High	Low
Modularity and Reusability	Medium	High
Ease of Usage	High	Complex

3 Algorithms used in sensor fusion applications

Sensor fusion combines data from multiple sensors to obtain more consistent, reliable and accurate information. This technique is used in various applications and increases system performance due to the different features and capabilities of the algorithms. With developing technologies, a wide range of sensor fusion algorithms are used, from classical methods such as Kalman Filters (EKF and UKF) to modern techniques such as Deep Learning (DNN, CNN, LSTM) and Graph Neural Network (GNN). These algorithms significantly contribute by providing effective solutions in various fields, such as autonomous driving, robotic control, healthcare and rehabilitation. Each of these different algorithms can be optimized according to application requirements and tailored to perform best on specific tasks. For example, in scenarios such as home rehabilitation studies, algorithms such as Extended Kalman Filter (EKF) and Unscented Kalman Filter (UKF) have been used to estimate motion by integrating inertial and visual sensor data [63]. Studies have shown that both fusion algorithms offer similar accuracy levels, but UKF has higher computational power.

Table 3. The reviewed sensor fusion applications according to their algorithms and categories.

Reference	Category	Algorithm
[63]	Probabilistic	EKF and UKF
[64]	DL-Based and Probabilistic	EKF, PF, LSTM
[65]	DL-Based	DNN
[66]	DL-Based	TransFuser
[67]	DL-Based	CNN
[68]	DL-Based	AutoEncoder
[69]	DL-Based	Transformer
[70]	DL-Based	MFIN
[71]	DL-Based	RNN
[72]	DL-Based	LSTM
[73]	ML-Based	AdaBoost
[75]	Probabilistic	Dempster Shafer
[78]	DL-Based	RNN
[79]	DL-Based	CNN
[80,81]	DL-Based	RCNN
[82]	DL-Based	SPP-Net
[83]	DL-Based	Fast-RCNN
[84,85]	DL-Based	Faster-RCNN
[87,88]	DL-Based	YOLO
[94,95]	DL-Based	SSD
[97,98]	DL-Based	DSSD
[99]	Feature Maps	Network Scan

Information from force, encoder, and visual detection is integrated with differentiable filters (EKF, Particle Filter (PF), LSTM) to perform state estimation in specified tasks. The results have been compared with Bayesian filters and crossmodal weighted fusion methods [64].

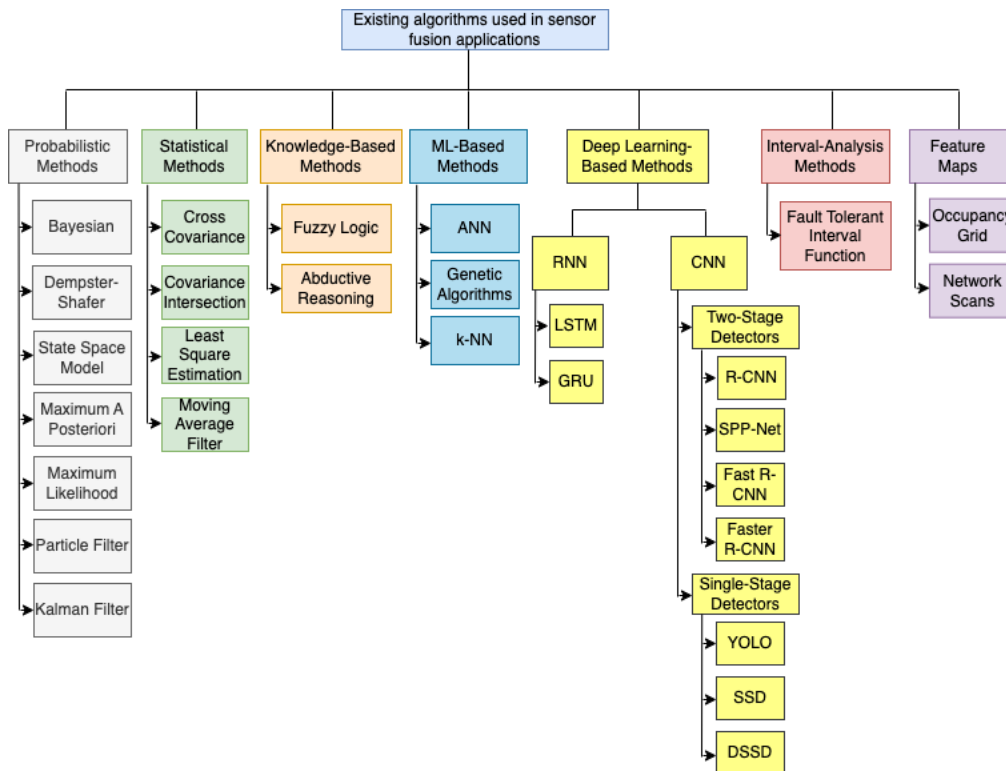


Figure 9. The algorithms used in sensor fusion applications in the literature.

On the other hand, Deep Learning and multi-modal sensor fusion techniques have been used to increase autonomous driving performance and generalization ability. For example, RGBD and Lidar sensors have been integrated using the Deep Neural Network (DNN) algorithm and 100% success has been achieved in training and static navigation tasks [65]. The TransFuser method, on the other hand, integrates image and Lidar data for finite driving using self-attention [66]. This method uses multiple transducer modules to fuse perspective views and feature maps, reducing average collisions per kilometer by 48% compared to geometric fusion. RGB and Lidar sensor data are combined with CNN to optimize environmental sensing of autonomous driving systems in complex urban environments [67]. Another study using sensor fusion techniques for autonomous driving systems introduced a new method called BEVFusion [68]. Using multi-sensor data, BEVFusion combines LiDAR and camera features in a bird's-eye view (BEV) representation space while preserving geometric and semantic information. BEVFusion transforms multi-modality features like LiDAR and camera into a unified bird's eye view (BEV) representation space with efficient view-to-view transformations. It processes these combined BEV features with a fully convolutional BEV autoencoder and supports different 3D sensing tasks with task-based heads.

In another study, the Transformer-based sensor fusion method, which can be used in many sensing systems, such as autonomous driving and robotics, has been examined [69].

Integrating body sensor networks (BSN) in medical services has gained significant importance. One study used

an interpretable neural network (MFIN) method for BSN integration by combining various sensor, communication, robotic, and data processing technologies [70]. MFIN uses CNN, Recursive Neural Network (RNN), CapsNet and Random Forest (RF) algorithms to extract features from sensor data, and Graph Neural Network (GNN) and CapsNet algorithms to correlate features. The obtained features are combined with a Bayesian network. In another study, RNN has been used for BSNs integration [71]. In another study performing Human Activity Recognition, multimodal sensor fusion consisting of IMU sensors and measurements of an Android device has been performed with the LSTM model [72].

Additionally, in complex tasks such as disease prediction, the AdaBoost machine learning algorithm has been used to integrate various sensor data such as pressure, light sensitivity, motion, electrical signal, current, acceleration, and angular velocity [73]. In this review, sensor fusion techniques and sensor fusion algorithms are categorised separately. There are multiple classifications of sensor fusion algorithms in the literature. Elmenreich [29] classified some sensor fusion algorithms as state estimation and decision fusion methods. In [30], sensor fusion algorithms are classified in two different ways: classical fusion algorithms and deep learning fusion algorithms. Sensor fusion algorithms for WSNs are divided into categories: inference, estimation, compression, reliable abstract sensors, feature map, aggregation and an information theory approach [32]. In addition, recent studies used DL-based algorithms in sensor fusion applications [33-35]. In this section, the existing algorithms used in sensor

fusion applications in the literature are categorised as in Figure 9. Additionally, Table 3 summarises the reviewed sensor fusion applications according to their algorithms and categories.

3.1 Probabilistic methods

Probabilistic methods estimate probability distributions of various situations to make accurate and reliable predictions under uncertainty. It is more common to use it in uncertain and complex systems. Existing probabilistic method algorithms are as follows:

Bayesian: The Bayesian approach provides a theoretical framework that deals with uncertainties utilising a foundational graphical framework. This approach is well-suited for analysing past events and forecasting the probability of various causes contributing to their occurrence. Mathematically, it is as in Equation (1) [74].

$$P(C|D) = \frac{P(C|D)P(C)}{P(D)} \quad (1)$$

In this context, P(C) represents the likelihood of event C occurring independently, while P(D) signifies the probability of event D unfolding without any external influence. Meanwhile, P(D|C) denotes the probability of event D happening, given that event C has already transpired. The resulting probability of the condition, P(C|D), falls within the range of zero to one [1 0], indicating the likelihood of event C occurring given event D. In other words, this signifies event P(C|D). Although Bayesian theory has the advantage of simplicity of calculation and high probabilities for the correct decision, it has some disadvantages. These disadvantages include difficulty recognising decision uncertainty, complexity due to many events that depend on multiple hypotheses and conditions, and difficulty determining the value of prior probabilities.

Dempster-Shafer: The Dempster-Shafer method is a probability theory-based approach that enables the combination of different evidence under uncertainty and the making of predictions by considering situations where this evidence may conflict with each other. It has become popular in applications such as signal decoding and recognition and pattern recognition. It provides a vital formula that combines a variety of evidence from different sources. The Dempster Shafer has been evaluated for various perceptual tasks, encompassing sensor fusion, scene interpretation, recognition of object targets, and object validation. The method combines information from different sources. It uses belief and probability values to represent evidence and corresponding uncertainty [75,76]. The technique uses "belief" instead of probability. The Belief function is used to describe the uncertainty of the hypothesis. The hypothesis probability is defined by the mass function m. The amount of belief in a hypothesis (A) is represented by a belief function [77].

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (2)$$

In Equation (2), the sum of the mass probabilities of all subsets of A assigned according to m is calculated. The presence of two or more pieces of evidence is combined using the join rule in Equation (3).

$$m(A) = \frac{\sum_{i,j} m_1(B_i) \cdot m_2(C_j)}{B_i \cap C_j = A} \quad (3)$$

Here, 1-k is a normalisation factor, which is the sum of all non-zero values given to the \emptyset hypothesis. A feature is classified based on the maximum belief decision rule, which assigns it to class A if the total amount of beliefs supporting A is more significant than those not supporting A. This situation is expressed mathematically as in Equation (4).

$$Bel(A) \geq Bel(\bar{A}) \quad (4)$$

State-Space Model: A state-Space model is a probability-based approach used for the mathematical modelling of dynamic systems. It describes the state variables in a system and how these variables evolve. The state space model consists of two primary components: the state equation and the measurement equation. The state equation describes how the state variables change over time and expresses the system dynamics as a first-order differential equation. Equation (5) shows the state equation:

$$x_{k+1} = F_k x_k + B_k \mu_k + w_k \quad (5)$$

x_{k+1} represents the value of the state in the system at the next step. x_k is the value of the system state at the current time step. F_k is the transition matrix that indicates how the system evolves. B_k is the control input matrix and suggests the effect of control inputs on state inputs, if any. μ_k represents control inputs. w_k represents a continuous and discontinuous random process (usually noise). The measurement equation relates the observable outputs of the system to state variables. It indicates the relationship between real-world data and the model and is calculated as in Equation (6).

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (6)$$

y_k represents the measurement vectors received from the system. x_k represents the state in the system. H_k is the measurement matrix that shows how state variables in the system are associated with measurements. v_k represents measurement error or noise.

Maximum a Posteriori: This approach is a probabilistic approach that determines the most probable value of a parameter using Bayes' theorem. It estimates parameters by modelling the relationship between prior information about a parameter or event and observed data. According to Bayes' theorem, the posterior distribution of a parameter is calculated based on priori and observed data. The maximum

a posteriori selects the value at the maximum point of this posterior distribution, which provides the most probable estimate of the parameter. This method is a version of maximum likelihood that considers previous information about a parameter or event. If prior information is available and reliable, the maximum a posteriori estimate may be more robust than the maximum likelihood estimate. The maximum a posteriori estimate based on Bayes' theorem is calculated as in Equation (7).

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta).P(\theta)}{P(D)} \quad (7)$$

Here, $P(\theta | D)$ represents the a posteriori probability of parameter θ when data D is observed. $P(D | \theta)$ represents the probability of parameter θ when data D is observed. $P(\theta)$ represents the prior probability of θ , and $P(D)$ represents the marginal probability of data D . Maximum a Posteriori selects the parameter θ value at the maximum point of the a posteriori likelihood as in Equation (8).

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} P(\theta|D) \quad (8)$$

When data from multiple sensors in a system must be combined to predict or measure the system state, the measurement of each sensor may have a different probability distribution. Combining a priori information with the maximum a posteriori can provide the most accurate estimate in this situation.

Maximum Likelihood is a probabilistic method for estimating the most likely value of a parameter by combining measurements from different sensors. It considers the probability distributions of each sensor measurement and combines these distributions to provide the most probable estimate. Firstly, measurement probability distributions from each sensor are calculated. These distributions express uncertainty around the actual value of the measurement. Secondly, the calculated probability distributions are combined. A probability distribution is obtained by combining measurements from all sensors. Considering each sensor measurement, a distribution containing the most probable value of the system state is obtained. Thirdly, the combined probability distribution makes the most likely prediction of system parameters. Finally, system status estimates are updated and improved with new sensor measurements. More accurate predictions are obtained when sensor data are combined with maximum likelihood. However, this method requires obtaining accurate probability distributions of each sensor measurement and may present some practical difficulties. Let the model parameters be assumed to be θ and the observed data be D . The likelihood function for the data set indicates the probability of the data set under the parameter θ and is denoted by $P(D|\theta)$. The most probable parameter estimate is obtained by maximising the likelihood function. Mathematically possible parameter estimation is as in Equation (9).

$$\hat{\theta}_{\text{maximum likelihood}} = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} P(D|\theta) \quad (9)$$

Likelihood functions often involve multiplication operations, and the logarithmic functions convert multiplication operations to addition operations. This makes the calculation easier. Maximum likelihood estimates are maximised with the log-likelihood function and calculated as in Equation (10).

$$\hat{\theta}_{\text{maximum likelihood}} = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} \log P(D|\theta) \quad (10)$$

Particle Filter: The PF method uses a Sequential Monte Carlo (SMC) to solve the state estimation problem and can approximate Probability Density Functions (PDFs). PF involves a resampling step at each instant, using the Sequential Importance Sampling (SIS) algorithm. The density function is created by several random samples called particles. In the particle production stage, initial particles $p(x(0))$ are generated according to the initial probability density function (PDF) $N\{x_1(0), x_2(0), x_3(0), \dots, x_N(0)\}$. In the estimation phase, each particle $x_i(k+1)$ is propagated according to $p(x(k+1) | x(k))$, which is the PDF of $x_i(k+1)$. Each particle calculates the sum of random noise to simulate the noise effect. In the sampling phase, $w_i(k+1) = p[z(k+1) | x_i(k+1)]$ is created for each $x_i(k+1)$ particle. In the normalisation and rejected samples stage, the weights of the particles are normalised. Low-weight particles are removed, and high-weight particles are copied so that each particle has the same weight. PF is evaluated in traffic control, military field, mobile robot positioning and self-positioning.

Kalman Filter (KF): The Kalman Filter (KF) algorithm estimates the state of a discrete time-controlled process characterised by a linear stochastic equation. It relates the state from the previous time step to the current measurement to accurately extract the current state. This method is a preferred algorithm, mainly due to its direct applicability to linear systems. Kalman Filter formulation is as in Equation (11).

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= F_k x_{k-1} + B_k u_k \\ P_k &= F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \end{aligned} \quad (11)$$

\hat{x}_k is state vector of x_k system. P_k is the estimated covariance matrix. F is the dynamics of the system matrix. B refers to the control matrix, and Q refers to the noise covariance. KF is used to generate new predictions by adding an external unit for correction. The KF includes the step in Equation (12) to update the state.

$$\begin{aligned} \hat{x}'_k &= \hat{x}_k + K'(z_k - H_k \hat{x}_k) \\ P'_k &= P_k - k' H_k P_k \\ K' &= P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

Here, z_k contains the measurement vectors from the sensors. H is the transformation matrix. R represents the covariance matrix of noise measurements and the k time interval. Kalman gain (K) refers the amount of update needed

based on the relationship between prediction accuracy and measurement noise. Weighting is done on each iterative prediction. KF is the most appropriate estimator that can be used to predict the statistical behavior of measured values. In most real problems, systems cannot provide linear characteristics. EKF is suitable for this problem. The main benefit of the Kalman filter is its computational cost, but it can only express single modality distributions. Another version of the KF is the UKF.

3.2 Statistical methods

Statistical methods use statistical methods to extract meaningful information from noisy sensor measurements. Statistical method algorithms are as follows:

Cross Covariance: It is a statistical method used to measure the relationship between two variables. Cross-covariance helps determine the direction and strength of the relationship between two variables and how lagged it is. Firstly, the average of two different variables is calculated. This means calculating the average of the observed values of each variable. Secondly, the differences between the averages of both variables are taken. These differences are then multiplied and averaged. The covariance of two variables is calculated as in Equation (13).

$$Cov_{XY}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (X(t+k) - \bar{X})(Y(t) - \bar{Y}) \quad (13)$$

k refers to the delay between two variables. n refers to the total number of observations. X(t) and Y(t) refer to the values of the variables X and Y at time t, respectively. \bar{X} and \bar{Y} refer to the averages of the variables X and Y, respectively. If the cross-covariance is positive, the relationship between the variables is positive. If the cross-covariance is negative, the relationship between the variables is negative. Additionally, the size of the cross-covariance value indicates the strength of the relationship.

Covariance Intersection: It is a statistical method that combines the covariance matrices of data from different sensors. These covariance matrices represent the uncertainty and accuracy of each sensor measurement. The method aims to obtain a more reliable estimate by combining these uncertainties. Firstly, the covariance matrices of the measurements from each sensor are calculated. Then, the calculated covariance matrices are joined to obtain a single covariance matrix. Different methods can be used during the join phase. However, the weighted join method is often used in covariance intersection. Weights are assigned based on the reliability of sensor measurements. Covariance intersection is calculated as in Equation (14).

$$\Sigma_{covariance\ intersection} = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \Sigma_i^{-1} \right)^{-1} \quad (14)$$

Σ_i^{-1} is the inverse of the covariance matrix of each sensor, and α_i is the weight of each sensor.

Least Square Estimation aims to minimise the error between data points. It is frequently used in applications such

as linear regression and curve fitting. Least square estimation tries to minimize the sum of the squares of the differences between the data points and the values predicted by the model. It is a practical and easy-to-calculate method. However, it may give misleading results in the presence of outliers and cases that do not comply with the linearity of the model. Therefore, the characteristics of the data set and the suitability of the model should be carefully evaluated. Data from sensors can often have different accuracy, sensitivity, and noise levels. Therefore, least square estimation plays an important role in obtaining accurate and reliable results by combining sensor data. The Least state estimation method increases the accuracy and reliability of sensor data and can combine different types of sensors and measurement data. It is calculated as in Equation (15).

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (15)$$

$\hat{\theta}$ represents the estimated parameter vector, X represents the design matrix containing independent variables, y represents the dependent variable vector consisting of actual values or observed results.

Moving Average Filter is a widely used statistical method for correcting or smoothing data in time series. This filter can be used to reduce random noise in the data or identify trends in the data set. The basic principle of the moving average filter is to replace each data in a time series with the average of data taken over a certain period (for example, the last N measurements). The average of measurements for a specified period provides a more accurate estimate of the original data. Firstly, a window size is selected for the filter. Secondly, the window is moved along the time series, and for each window position, the average of the measurements across the window is calculated. Finally, the calculated average value changes the relevant point of the original time series data to filtered data. In this method, choosing the correct filter size is very important. Because filter size directly affects the results. Moving average filter is calculated as in Equation (16).

$$Moving\ Average_t = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{t-i} \quad (16)$$

$Moving\ Average_t$ is the moving average value at time t. x_{t-i} is the measurement value at time t-i. N refers to the window size.

3.3 Knowledge-based methods

Knowledge-based methods rely on domain-specific knowledge or rules. This method is used to interpret sensor measurements and make decisions. Fuzzy logic and abductive reasoning are knowledge-based sensor fusion methods.

Fuzzy Logic: This algorithm uses imprecise concepts and expressions to deal with uncertainty. Fuzzy logic uses fuzzy or gradient categories instead of strict boundaries. Therefore, it is suitable for modeling and controlling systems with uncertain or fuzzy information. For example, fuzzy logic can be used to describe quantities such as temperature, velocity

or position. The fuzzy logic model is constructed by leveraging the expertise and insights of domain experts. In this method, combining is performed by considering the degrees of uncertainty and uncertainties instead of assigning sensor data to precise categories.

Abductive Reasoning generates a set of possible explanations or hypotheses and uses available evidence to determine their accuracy. This process can consider existing evidence, as well as experience, understanding, and intuition. Abductive reasoning can be used to interpret or make sense of sensor data before sensor fusion.

3.4 ML-based methods

Machine Learning-Based Methods are an important approach to integrating different sensor data and obtaining more accurate results. This method algorithms are as follows:

Artificial Neural Network (ANN): This machine-learning model draws inspiration from the structure and function of biological neural networks. In sensor fusion, ANN helps obtain more comprehensive information by processing data from multiple sensors and learning the relationship between these data. ANN is as in Equation (17).

$$y = \sigma(W_L \cdot \sigma(W_{L-1} \cdot \dots \cdot \sigma(W_1 \cdot x + b_1) + b_{L-1}) + b_L) \quad (17)$$

X is the vector representing the input data and, y represents the vector of output data. W_i is the weight matrix in the i_{th} layer. b_i represents the bias vector in the i_{th} layer and σ represents the activation function. The use of ANN in a specific sensor fusion problem varies depending on the architecture of the network and the problem. It is important to adjust the network architecture and activation function depending on the application and problem.

Genetic Algorithms is an ML algorithm that mimics the principles of natural selection and genetic inheritance. It can be used in sensor fusion to find and optimize relationships between different sensor data. It looks for many combinations of traits of individuals within a population. It achieves these combinations by iteratively crossing individuals, mutating them, and selecting the best-performing individuals. In the first step, a random initial population $P_0 = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}$ is created. This population consists of individuals representing data from sensors. In the second step, a fitness function $f(I_i)$ is created that evaluates the fitness of each individual. This function measures success in achieving a specific goal or optimizing a goal. In the third step, some of the individuals in the population are selected according to the fitness function and used for the next generation. Then, a crossover is performed between the selected individuals. This process creates new individuals by selecting the characteristics of the parents. Finally, the mutation is applied to the created individuals. The genetic structure of these individuals is randomly changed to increase diversity. As a result of crossover and mutation, a new generation is created.

k-Near-Neighbors (k-NN): Sensor fusion leverages k-Nearest Neighbors (k-NN) to cluster and merge data originating from disparate sensors. k-NN calculates the

distance between two samples with distance measures such as Euclidean or Manhattan. Grouping is done by calculating the distances of each sample from all other samples and selecting the k closest samples. During grouping, a majority vote or an average value calculation can be performed between class labels. For K-NN, the distance is as in Equation (18).

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (18)$$

3.5 Deep learning-based methods

Deep learning techniques have become popular for sensor fusion. Deep learning models can learn to extract features and combine sensor data end-to-end.

Recursive Neural Network (RNN): RNNs feed back the outputs from previous steps to the inputs from subsequent steps. This is ideal for modelling dependencies in time-series data. Distributed sensors are employed for monitoring both the vital signs and behavioural patterns of individuals. Sensor fusion applications have increased to provide valuable lifestyle-related data and recognition of physical human action through body sensors. In [78], a body sensor-based sensor fusion method has been proposed for behavior recognition using RNN. In the study, multiple body sensor fusion such as electrocardiography (ECG), accelerometer and magnetometer has been performed. RNN is as in Equation (19).

$$\begin{aligned} h_t &= \sigma(W_{ih}x_t + W_{hh}h_{t-1} + b_h) \\ y_t &= \sigma(W_{ho}h_t + b_o) \end{aligned} \quad (19)$$

x_t represents the input vector at time t. h_t is the hidden layer vector (RNN memory) at time t. y_t represents the output vector at time t. W_{ih} refers the weight matrix from the input layer to the hidden layer while W_{hh} refers the weight matrix from hidden layer to hidden layer. W_{ho} refers to the weight matrix from the hidden layer to the output. b_h and b_o represent the hidden layer and output bias vectors. σ refers to activation functions such as sigmoid and tanh.

Long-short-term memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) models derived from the RNN architecture are specifically engineered to capture long-term dependencies within data sequences more effectively. A drawback of RNNs is that they need to capture long-term dependencies better. This is especially important for tasks where long-term dependencies are important, such as time series data. LSTM and GRU have special memory mechanisms to better model long-term dependencies. LSTM includes a cell state and three gates (input, forget, output). These gates control the insertion of information into the cell state. GRU has a simpler structure than LSTM. It consists of only two gates (reset and update). These gates control forgetting past information and adding new information. LSTM has more parameters than GRU. Therefore, LSTM is more complex

and flexible than GRU. GRU training time is faster than LSTM and requires less computation.

Convolutional Neural Networks (CNN): CNNs are popular for combining or analyzing data obtained from image-based sensors. In autonomous vehicles, CNNs can be used to process images obtained from camera sensors and detect objects. However, the direct transfer of these modalities is a significant challenge due to processing multimodal sensor data and the lack of large labelled datasets. In [79], CNN has been used in multi-modal sensor fusion for human action recognition. CNN has been used to extract higher abstraction features from each sensor data. Then, these features have been combined. In the convolutional layer, filters (kernels) are applied to the input data and feature maps are produced. This process is as in Equation (20).

$$z^{[l]} = \sum_{i=1}^n W^{[l]} * x^{[l-1]} + b^l \quad (20)$$

$z^{[l]}$ is convolution layer output, $W^{[l]}$ is the filter weight matrices in the layer, $x^{[l-1]}$ is the input data from the previous layer, b^l is the bias vector of the layer.

The pooling layer's primary function is to diminish the dimensions of feature maps acquired post-convolution while condensing and abstracting the extracted features. A fully connected layer flattens feature maps and establishes full connectivity for tasks such as classification or regression. CNNs consist of convolution, pooling and fully connected layers.

When categorizing CNNs based on object recognition tasks, they are classified into two-stage and single-stage detectors. Two-stage detectors initiate the process by employing a region proposal network (RPN) to generate object proposals. This network produces a region recommendation to determine the potential object region on the image. At this stage, no prediction is made about any object; only possible region suggestions are produced. Then, the feature vectors associated with the recommendation region and the image region are classified using a classifier (usually a CNN). In this phase, object classification and location adjustment are performed on each region proposal. Single-stage detectors perform object classification and location detection directly on the image. There is no suggestion generation step, and the detector directly predicts the object for each pixel. It provides a faster operation compared to two-stage detectors.

Two-stage detectors can provide higher sensitivity and accuracy than single-stage detectors but require more computational cost and processing time.

Region-based CNN (R-CNN): It is the first two-stage detector introduced [80]. The algorithm aims to reduce the computational load and increase the detection speed. Instead of covering all regions of an image, 2000 regions of the image are primarily created with a selective search algorithm. Feature extraction is performed with CNN from the selected regions. Then, extracted features are classified with a Support Vector Machine (SVM) algorithm. RCNN

has been used to study the effect of combining thermal and visible images on pedestrian detection during the day and at night [81]. The study's RCNN architecture has been tested with both early and late fusion. It has been observed that image detection takes approximately 47 seconds. This result is not optimal for real-time applications. Classification of 2000 priority regions increases the training time of the R-CNN model.

Spatial Pyramid Pooling (SPP)-Net: This novel approach is introduced to address the limitations observed in the R-CNN algorithm [82]. Employing multiple pooling layers at various scales, this innovative method facilitates the manipulation of input images through cropping and resizing. Notably, it removes the necessity to conform to a specific aspect ratio. Irrespective of input size fluctuations, SPP-Net can produce a constant-length representation. Unlike R-CNN, which individually processes all 2000 regions, SPP-Net operates on the entire image simultaneously, resulting in a marked enhancement in algorithmic processing speed.

Fast-R-CNN is developed to increase the training and testing speed of R-CNN [83]. In the new version, input images are processed, and a convolutional feature map is produced instead of region suggestions being processed by the CNN network. Fast-R-CNN is nine times faster in training and 213 times faster in inference compared to R-CNN.

Faster-R-CNN: While Fast-R-CNN offers notable enhancements in processing speed, it relies on a selective search algorithm to detect regions and their corresponding bounding boxes. This results in a considerable processing delay. To overcome this drawback, a region proposal network (RPN) to estimate bounding boxes has been proposed [84]. This network introduces a model named Faster R-CNN, which integrates with R-CNN to share convolution features. With a test time of just 0.2 seconds, Faster R-CNN establishes itself as a promising choice for real-time applications. Faster R-CNN has successfully performed various tasks, such as pedestrian detection using thermal and colour images in day and night detection scenarios [85]. Single-stage detectors are faster than their two-stage counterparts. This method is more available for real-time development but has lower levels of precision and accuracy.

You Only Look Once (YOLO): Single-stage detectors employ a singular regression step instead of the multi-stage classification process utilized in other methods. YOLO is one of the most popular algorithms of single-stage detectors [86]. In YOLO, the input image is partitioned into a predetermined number of grids. After this, a single neural network estimates bounding boxes and determines their associated class probabilities. These operations are performed in a single step. Although YOLO exhibits greater speed than two-stage detectors, it often leads to higher localization errors and lower detection accuracy when dealing with small objects. These limitations have been improved in YOLOv2, YOLO9000 [87], and YOLOv3 [88]. In [89], YOLO has been used for 3D Lidar and RGB fusion. In another study, YOLOv3 has been used for vision and lidar point cloud fusion [90].

Single-Shot Multibox Detector (SSD): Observations indicate that the YOLO algorithm predominantly detects large objects. According to [91], YOLO's accuracy decreases when dealing with small and variable-scale objects, and according to [92], it imposes spatial constraints on bounding boxes, limiting the classification to a single object class. SSD has been proposed to remove these limitations in YOLO [93]. SSD is engineered to accommodate bounding boxes with diverse sizes and aspect ratios, empowering the algorithm to identify objects of varying dimensions within a single image. SSD has been used for general object detection in autonomous driving applications [94]. In another study, SSD has been used as a primary detector, and various fusion techniques have been compared to multiple CNN architectures [95].

Deconvolutional Single-Shot Detector (DSSD): Since small objects produce a limited number of pixels and information, detecting these objects becomes a burden. Improving accuracy is often prioritized over detection speed [96]. Instead of employing the original Visual Geometry Group (VGG) classifier, DSSD utilizes ResNet101. Consequently, it enhances the SSD algorithm by incorporating deconvolutional layers and enriching the contextual information. DSSD improves the detection of small objects by providing better-resolution feature maps. For pedestrian detection, colour and thermal images are combined using mid-fusion with the DSSD network [97,98].

3.6 Interval analysis methods

Interval analysis methods involve representing sensor measurements as intervals rather than exact values. This approach considers uncertainty and can provide robust fusion results, especially in the presence of sensor noise and errors.

Fault Tolerant Interval Function: This method primarily provides fault tolerance in sensor fusion. It is designed to detect errors in data from different sensors and respond to them tolerantly. For example, it can tolerate missing or incorrect data points or smooth out mismatches between sensor data. Measurement errors, sensor malfunctions, and environmental effects can cause errors in sensor data. The fault-tolerant interval function allows the system to avoid incorrect results caused by incorrect data and works more reliably. The fault tolerant interval function is shown in Equation (21).

$$y(t) = x(t) + e(t) \quad (21)$$

$y(t)$ represents the corrected output, $x(t)$ represents the input, and $e(t)$ represents errors or uncertainties in the data from the sensors. $e(t)$ can change depending on the characteristics of a particular fault tolerant interval function and the methods used.

3.7 Feature maps

Feature maps are representations of sensor data that highlight important features or patterns. They are used to preprocess sensor data before fusion or as input to fusion algorithms.

Occupancy Grid: In sensor fusion, it can be used to combine data from different sensors and extract or update feature maps. It is represented by a matrix. This matrix divides an environment at specific resolutions and represents an occupied or empty state of each cell ($O_{i,j} = \{0,1\}$). $O_{i,j}$ represents the cell in the i,j index of the matrix. 1 means occupied, 0 means empty. The Occupancy grid is updated with various sensor data. For example, environmental sensors such as a LIDAR sensor, radar sensor, or camera can provide data in different directions and resolutions. This data is used to mark specific cells of the occupancy grid as occupied (1) or empty (0).

Network Scans: Sensor fusion provides more comprehensive environmental sensing by combining data from network scanners with data from other sensors. For example, a network scanner can detect IP addresses, connection states, and other network properties of devices, while other sensors can detect physical objects in the environment. Among the most commonly used network scanning techniques is eScan [99]. eScan gathers data within WSNs and generates maps based on the information collected.

4 Conclusion

Sensor fusion integrates data from multiple sensors to acquire comprehensive, reliable, and accurate information. It enhances system performance by ensuring redundancy in case of sensor failure and by combining data from sensors with different sensitivities to better adapt to environmental conditions. Moreover, sensor fusion techniques streamline processing costs by condensing sensor data into fewer, more meaningful datasets.

Algorithms used in sensor fusion applications vary in implementation and effectiveness depending on specific use cases and system requirements. Algorithms such as Kalman filtering and covariance intersection are favoured for their ability to handle Gaussian noise well, making them suitable for applications such as robotics localisation and navigation systems tracking. These algorithms rely on probabilistic models to effectively integrate sensor data and provide robust predictions even in noisy environments. In contrast, knowledge-based algorithms such as fuzzy logic and abductive reasoning are superior in scenarios where sensor data is inherently uncertain. Fuzzy logic enables flexible decision-making based on fuzzy sets and linguistic variables, making it ideal for systems that require human-like reasoning in uncertain situations. Abductive reasoning complements this by extracting the most plausible explanations from incomplete or conflicting sensor inputs. Therefore, it is useful in diagnostic applications such as fault detection systems. Algorithms such as ANNs and CNNs are increasingly preferred because they can learn complex relationships and patterns directly from data. ANNs are preferred for tasks such as object recognition in autonomous vehicles due to their ability to integrate various sensor inputs and generalize from large data sets. On the other hand, CNNs excel at processing image-based sensor data and perform well in applications requiring real-time object detection and classification. Interval analysis algorithms provide

robustness against sensor noise and errors by representing sensor measurements as intervals rather than precise values. These algorithms are effective in fault-tolerant systems where maintaining system reliability during sensor failures is critical.

Each algorithm offers unique advantages tailored to specific sensor fusion applications. For example, statistical algorithms are preferred in scenarios that require precise prediction with minimal computational load, while knowledge-based methods are effective for systems that require adaptive decision-making in uncertain environments. Machine learning-based algorithms are particularly valuable in applications that require high accuracy in complex data interpretation. By understanding these strengths, researchers can effectively select the optimal algorithm to optimize system performance and reliability in real-world applications.

In recent years, sensor fusion applications have increasingly embraced the power of artificial intelligence (AI) algorithms. Integrating AI and ML algorithms in sensor fusion applications presents opportunities and challenges. AI/ML's big data analysis capabilities can be used at all levels of sensor fusion. However, combining the condition and impact assessment methods of sensor fusion with AI/ML's big data-based object assessment classification is difficult. For example, although AI/ML has been successful in big data analysis, it still faces challenges for more complex problems such as force structure analysis and intent assessment. AI/ML methods must develop robust models to reduce uncertainty with reliable and consistent performance bounds in this context. The combination of AI/ML and sensor fusion offers significant opportunities in contextual modelling, context awareness methods for situational assessment, and model-based AI/ML methods for threat assessment. Future coordination efforts include the development of contextual models, the ability of AI/ML to transfer learning from one state to another, understanding models derived from principles, and distributed architectures for multi-sensor and multi-algorithm coordination. These efforts aim to increase AI/ML's explainability, ensuring its broader acceptance and effectiveness in sensor fusion applications.

There is a wide range of potential future advances in sensor fusion applications that could further improve functionality and use cases. Integrating AI and ML algorithms allows sensor fusion applications to learn from experience, adapt to new environments and make smarter decisions. Thus, improvements in areas such as navigation and obstacle avoidance are expected to be achieved in the future. In addition, advances in edge computing enable systems to be more efficient in dynamic environments by processing data in real-time, reducing delay, and increasing decision-making speed. Energy efficiency and sustainability advances can contribute to developing systems with longer battery life powered by sustainable power sources, expanding operational capabilities and reducing environmental impact. By evaluating these potential advances and integrating them into the design and development of sensor fusion applications, researchers and

engineers can further increase these systems' functionality, performance, and versatility and create new uses across various industries and fields.

Acknowledgment

Hande ÇAVŞI ZAİM, one of the authors of this article, is supported by the Council of Higher Education of the Republic of Turkey, 100/2000 PhD scholarship in Advanced Robotic Systems and Mechatronics.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 21%

References

- [1] F. E. White, JDL, Data Fusion Lexicon, Technical Panel for C3 15, 1991.
- [2] Hall, L. David, J. Llinas. An introduction to multisensor data fusion. Proceedings of the IEEE, 85(1), pp. 6-23, 1997. <https://doi.org/10.1109/5.554205>
- [3] F. Castanedo, A review of data fusion techniques. The Scientific World Journal, 2013(1), 704504, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/704504>
- [4] K. S. Nagla, M. Uddin, D. Singh. Multisensor data fusion and integration for mobile robots: a review. IAES International Journal of Robotics and Automation, 3(2), pp. 131, 2014.
- [5] H.F. Durrant-Whyte. Sensor models and multisensor integration. The International Journal of Robotics Research, 7(6), pp. 97-113, 1988. <https://doi.org/10.1177/027836498800700608>
- [6] R.C. Luo, M. G. Kay. A tutorial on multisensor integration and fusion. In Proceedings IECON'90: 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, pp. 707-722, 1990. <https://doi.org/10.1109/IECON.1990.149228>
- [7] J. Llinas, D. L. Hall, An introduction to multi-sensor data fusion. In: ISCAS'98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 6, pp. 537-540, May 1998. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.1998.705329>
- [8] M. B. Alatise, G. P. Hancke, A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. IEEE Access, 8, 39830-39846, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975643>
- [9] M. L. Fung, M. Z. Chen, Y. H. Chen, Sensor fusion: A review of methods and applications. In 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp. 3853-3860, IEEE, May 2017. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7979175>
- [10] K. Akkaya, I. Guvenc, R. Aygun, N. Pala, A. Kadri, IoT-based occupancy monitoring techniques for energy-efficient smart buildings. In 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), pp. 58-63, IEEE, March 2015. <https://doi.org/10.1109/WCNCW.2015.7122529>
- [11] N. Ouerhani, N. Pazos, M. Aeberli, M. Muller, IoT-based dynamic street light control for smart cities use cases. In 2016 International Symposium on Networks,

- Computers and Communications (ISNCC), pp. 1-5, IEEE, May 2016. <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2016.7746112>
- [12] F. Kirsch, R. Miesen, M. Vossiek, Precise local-positioning for autonomous situation awareness in the Internet of Things. In 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), pp. 1-4, June 2014. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848674>
- [13] C. L. Wu, Y. Xie, S. K. Pradhan, L. C. Fu, Y. C. Zeng, Unsupervised context discovery based on hierarchical fusion of heterogeneous features in real smart living environments. In 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pp. 1106-1111, IEEE, August 2016. <https://doi.org/10.1109/COASE.2016.7743528>
- [14] S. K. Datta, R. P. F. Da Costa, J. Härrri, C. Bonnet, Integrating connected vehicles in Internet of Things ecosystems: Challenges and solutions. In 2016 IEEE 17th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), pp. 1-6, IEEE, June 2016. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2016.7523574>
- [15] S. Wildstrom, Better living through big data. Cisco Newsroom. Available: <http://newsroom.cisco.com/feature/778800/Better-Living-Through-Big-Data>, Accessed 11 March 2024.
- [16] W. Ding, X. Jing, Z. Yan, and L. T. Yang, A survey on data fusion in internet of things: Towards secure and privacy-preserving fusion, *Information Fusion*, vol. 51, pp. 129-144, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.12.001>
- [17] A. Westenberger, M. Muntzinger, M. Gabb, M. Fritzsche, and K. Dietmayer, Time-to-collision estimation in automotive multi-sensor fusion with delayed measurements, in *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2013: Smart Systems for Safe and Green Vehicles*, Springer International Publishing, pp. 13-20, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00476-1_2
- [18] X. Wei, Autonomous control system for the quadrotor unmanned aerial vehicle, in 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), IEEE, pp. 796-799, August 2016. <https://doi.org/10.1109/URAI.2016.7733984>
- [19] H. C. Longuet-Higgins, A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections, *Nature*, 293(5828), pp. 133-135, 1981. <https://doi.org/10.1038/293133a0>
- [20] E. M. Upadhyay and N. K. Rana, "Exposure fusion for concealed weapon detection," in 2014 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), pp. 1-6, IEEE, March 2014. <https://doi.org/10.1109/ICDCSyst.2014.6926141>
- [21] A. M. Sagi-Dolev, Multi-threat detection system, U.S. Patent 8171810, 2012.
- [22] J. Favre, B. M. Jolles, O. Siegrist, and K. Aminian, Quaternion-based fusion of gyroscopes and accelerometers to improve 3D angle measurement, *Electronics Letters*, 42(11), p. 1, 2006. <https://doi.org/10.1049/el:20060124>
- [23] G. Koshmak, A. Loutfi, M. Linden, Challenges and issues in multisensor fusion approach for fall detection. *Journal of Sensors*, 2016(1), 6931789, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6931789>
- [24] A. Rihar, M. Mihelj, J. Pašič, J. Kolar, M. Munih, Using sensory data fusion methods for infant body posture assessment. In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) pp. 292-297, September 2015. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353388>
- [25] S. Knoop, S. Vacek, R. Dillmann, Sensor fusion for 3D human body tracking with an articulated 3D body model. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, pp. 1686-1691, May 2006. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1641949>
- [26] M. T. Yang, S. Y. Huang, Appearance-based multimodal human tracking and identification for healthcare in the digital home. *Sensors*, 14(8), 14253-14277, 2014. <https://doi.org/10.3390/s140814253>
- [27] S. Begum, S. Barua, M. U. Ahmed, Physiological sensor signals classification for healthcare using sensor data fusion and case-based reasoning. *Sensors*, 14(7), 11770-11785, 2014. <https://doi.org/10.3390/s140711770>
- [28] D. J. Yeong, G. Velasco-Hernandez, J. Barry, J. Walsh, Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: a review. *Sensors*, 21(6), 2140, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21062140>
- [29] W. Elmenreich, An introduction to sensor fusion. Vienna University of Technology, Austria, 502, pp. 1-28, 2002.
- [30] A. Deo, V. Palade, M. N. Huda, Centralised and Decentralised Sensor Fusion-Based Emergency Brake Assist. *Sensors*, 21(16), 5422, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21165422>
- [31] J. Fayyad, M. A. Jaradat, D. Gruyer, H. Najjaran, Deep learning sensor fusion for autonomous vehicle perception and localization: a review. *Sensors*, 20(15), 4220, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154220>
- [32] M. Almasri, K. Elleithy, Data fusion in WSNs: architecture, taxonomy, evaluation of techniques, and challenges. *Int J Sci Eng Res*, 6(4), 1620-36, 2015.
- [33] K. Huang, B. Shi, X. Li, S. Huang, Y. Li, Multi-modal sensor fusion for auto driving perception: a survey. *arXiv preprint arXiv:2202.02703*, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02703>
- [34] Y. Cui, R. Chen, W. Chu, L. Chen, D. Tian, Y. Li, D. Cao, Deep learning for image and point cloud fusion in autonomous driving: a review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(2), 722-739, 2021. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3023541>
- [35] Y. Wang, Q. Mao, H. Zhu, J. Deng, Y. Zhang, J. Ji, Y. Zhang, Multi-modal 3d object detection in autonomous driving: a survey. *International Journal of Computer Vision*, 131(8), 2122-2152, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11263-023-01784-z>

- [36] H. F. Durrant-Whyte, Sensor models and multisensor integration. *The International Journal Of Robotics Research*, 7(6), 97-113, 1988. <https://doi.org/10.1177/027836498800700608>
- [37] R. Willett, A. Martin, R. Nowak, Backcasting: adaptive sampling for sensor networks. In *Proceedings of the 3rd International Symposium On Information Processing In Sensor Networks*, pp. 124-133, April 2004. <https://doi.org/10.1145/984622.984641>
- [38] V. Gupta, R. Pandey, Data fusion and topology control in wireless sensor networks. *WSEAS Transactions on Signal Processing*, 4(4), 150-172, 2008.
- [39] K. Qian, S. Zhu, X. Zhang, L. E. Li, Robust multimodal vehicle detection in foggy weather using complementary lidar and radar signals. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 444-453, 2021.
- [40] X. Xu, L. Zhang, J. Yang, C. Cao, W. Wang, Y. Ran, M. Luo, A review of multi-sensor fusion slam systems based on 3D LIDAR. *Remote Sensing*, 14(12), 2835, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14122835>
- [41] J. Alfred Daniel, C. Chandru Vignesh, B. A. Muthu, R. Senthil Kumar, C. B. Sivaparthipan, C. E. M. Marin, Fully convolutional neural networks for LIDAR-camera fusion for pedestrian detection in autonomous vehicle. *Multimedia Tools and Applications*, 82(16), 25107-25130, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14417-x>
- [42] E. F. Nakamura, A. A. Loureiro, A. C. Frery, Information fusion for wireless sensor networks: methods, models, and classifications. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 39(3), 9-es, 2007. <https://doi.org/10.1145/1267070.1267073>
- [43] J. Samatha, G. Madhavi, Securesense: enhancing person verification through multimodal biometrics for robust authentication. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 25(2), 1040-1054, 2024. <https://doi.org/10.12694/scpe.v25i2.2524>
- [44] A. Rehman, T. Saba, M. Kashif, S. M. Fati, S. A. Bahaj, H. Chaudhry, A revisit of internet of things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture. *Agronomy*, 12(1), 127, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010127>
- [45] B. V. Dasarathy, Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 24-38, 1997. <https://doi.org/10.1109/5.554206>
- [46] E. Alpaydin, Classifying multimodal data. In *The Handbook of Multimodal-Multisensor Interfaces: Signal Processing, Architectures, and Detection of Emotion and Cognition*, 2, pp. 49-69, 2018. <https://doi.org/10.1145/3107990.3107994>
- [47] P. A. Neves, J. J. Rodrigues, K. Lin, Data fusion on wireless sensor and actuator networks powered by the ZenSens system. *IET communications*, 5(12), 1661-1668, 2011. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2010.0644>
- [48] C. Zhao, Y. Wang, A new classification method on information fusion of wireless sensor networks. In *2008 International Conference on Embedded Software and Systems Symposia*, pp. 231-236, IEEE, July 2008. <https://doi.org/10.1109/ICCESS.Symposia.2008.73>
- [49] K. Maraiya, K. Kant, N. Gupta, Study of data fusion in wireless sensor network. In *International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies*, pp. 535-539, 2011.
- [50] M. E. Liggins, C. Y. Chong, I. Kadar, M. G. Alford, V. Vannicola, S. Thomopoulos, Distributed fusion architectures and algorithms for target tracking. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 95-107, 1997. <https://doi.org/10.1109/JPROC.1997.554211>
- [51] E. Waltz, *Multisensor Data Fusion*, Boston: Artech House, 685, 1990.
- [52] E. Azimirad, J. Haddadnia, The comprehensive review on JDL model in data fusion networks: techniques and methods. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 13(1), 53, 2015.
- [53] D. E. Moshou, X. E. Pantazi, Data fusion and its applications in agriculture. In *Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme II: Data*, pp. 17-40, Springer International Publishing, 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84148-5_2
- [54] I. Ermolov, A novel data fusion architecture for uncrewed vehicles. In *21TH International Symposium On Measurement And Control In Robotics ISMCR*, pp. 26-28, 2018. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v8i4.684
- [55] M. Markin, C. Harris, M. Bernhardt, J. Austin, M. Bedworth, P. Greenway, D. Lowe, *Technology foresight on data fusion and data processing*. Publication of The Royal Aeronautical Society, 1997.
- [56] A. N. Afif, F. Noviyanto, S. Sunardi, S. A. Akbar, E. Aribowo, Integrated application for automatic schedule-based distribution and monitoring of irrigation by applying the waterfall model process. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(1), 420-426, 2020. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i1.1368>
- [57] C. Wang, T. Ji, F. Mao, Z. Wang, Z. Li, Prognostics and health management system for electric vehicles with a hierarchy fusion framework: concepts, architectures, and methods. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 6685900, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6685900>
- [58] M. Bevilacqua, A. Tsourdos, A. Starr, I. Durazo-Cardenas, Data fusion strategy for precise vehicle location for intelligent self-aware maintenance systems. In *2015 6th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, pp. 76-81, IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2015.37>
- [59] J. R. Boyd, *A discourse on winning and losing*. Maxwell Air Force Base, AL: Air University Press, 400, 2018.
- [60] M. Bedworth, J. O'Brien, The Omnibus model: a new model of data fusion?. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 15(4), 30-36, 2000. <https://doi.org/10.1109/62.839632>
- [61] K. Maraiya, K. Kant, N. Gupta, Study of data fusion in wireless sensor network. In *International Conference*

- on Advanced Computing and Communication Technologies, pp. 535-539, 2011.
- [62] R. Alami, R. Chatila, S. Fleury, M. Ghallab, F. Ingrand, An architecture for autonomy. *The International Journal of Robotics Research*, 17(4), 315-337, 1998. <https://doi.org/10.1177/027836499801700402>
- [63] Y. Tao, H. Hu, H. Zhou, Integration of vision and inertial sensors for 3D arm motion tracking in home-based rehabilitation. *The International Journal of Robotics Research*, 26(6), 607-624, 2007. <https://doi.org/10.1177/0278364907079278>
- [64] M. A. Lee, B. Yi, R. Martín-Martín, S. Savarese, J. Bohg, Multimodal sensor fusion with differentiable filters. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 10444-10451, IEEE, October 2020. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341579>
- [65] Z. Huang, C. Lv, Y. Xing, J. Wu, Multi-modal sensor fusion-based deep neural network for end-to-end autonomous driving with scene understanding. *IEEE Sensors Journal*, 21(10), 11781-11790, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3003121>
- [66] K. Chitta, A. Prakash, B. Jaeger, Z. Yu, K. Renz, A. Geiger, Transfuser: Imitation with transformer-based sensor fusion for autonomous driving. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3200245>
- [67] Y. Xiao, F. Codevilla, A. Gurram, O. Urfalioglu, A. M. López, Multimodal end-to-end autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 537-547, 2020. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3013234>
- [68] Z. Liu, H. Tang, A. Amini, X. Yang, H. Mao, D. L. Rus, S. Han, Bevfusion: Multi-task multi-sensor fusion with unified bird's-eye view representation. In *2023 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pp. 2774-2781, IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160968>
- [69] A. Singh, Transformer-based sensor fusion for autonomous driving: A survey. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pp. 3312-3317, 2023.
- [70] K. Lin, Y. Li, J. Sun, D. Zhou, Q. Zhang, Multi-sensor fusion for body sensor network in medical human-robot interaction scenario. *Information Fusion*, 57, pp. 15-26, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.11.001>
- [71] M. Z. Uddin, M. M. Hassan, A. Alsanad, C. Savaglio, A body sensor data fusion and deep recurrent neural network-based behavior recognition approach for robust healthcare. *Information Fusion*, 55, 105-115, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.08.004>
- [72] S. Chung, J. Lim, K. J. Noh, G. Kim, H. Jeong, Sensor data acquisition and multimodal sensor fusion for human activity recognition using deep learning. *Sensors*, 19(7), 1716, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19071716>
- [73] G. Shi, C. Geng, H. Liu, H. Su, Y. Jin, S. Sun, The human body characteristic parameters extraction and disease tendency prediction based on multi-sensing fusion algorithms. In *2016 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, pp. 126-130, IEEE, June 2016. <https://doi.org/10.1109/CYBER.2016.7574808>
- [74] A. Alofi, A. Alghamdi, R. Alahmadi, N. Aljuaid, M. Hemalatha, A review of data fusion techniques. *International Journal of Computer Applications*, 167(7), pp. 37-41, 2017. <https://doi.org/10.5120/ijca2017914318>
- [75] Q. Li, C. Zhang, Q. Hu, H. Fu, P. Zhu, Confidence-aware fusion using dempster-shafer theory for multispectral pedestrian detection. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2022. <https://doi.org/10.1109/TMM.2022.3160589>
- [76] M. O. Oloyede, G. P. Hancke, Unimodal and multimodal biometric sensing systems: a review. *IEEE Access*, 4, 7532-7555, 2016. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2614720>
- [77] K. Khoshelham, S. Nedkov, C. Nardinocchi, A comparison of Bayesian and evidence-based fusion methods for automated building detection in aerial data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(PART B7), 1183-1188, 2008.
- [78] M. Z. Uddin, M. M. Hassan, A. Alsanad, C. Savaglio, A body sensor data fusion and deep recurrent neural network-based behaviour recognition approach for robust healthcare. *Information Fusion*, 55, 105-115, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.08.004>
- [79] S. Münzner, P. Schmidt, A. Reiss, M. Hanselmann, R. Stiefelhagen, R. Dürichen, CNN-based sensor fusion techniques for multimodal human activity recognition. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium On Wearable Computers*, pp. 158-165, September 2017. <https://doi.org/10.1145/3123021.3123046>
- [80] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik, Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference On Computer Vision And Pattern Recognition*, pp. 580-587, 2014. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81>
- [81] J. Wagner, V. Fischer, M. Herman, S. Behnke, Multispectral Pedestrian Detection using Deep Fusion Convolutional Neural Networks. In *ESANN*, 587, pp. 509-514, April 2016.
- [82] K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun, Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 37(9), 1904-1916, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2389824>
- [83] R. Girshick, Fast r-cnn. In *Proceedings of the IEEE International Conference On Computer Vision*, pp. 1440-1448, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.169>

- [84] S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun, Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 39(6), 1137-1149, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031>
- [85] J. Liu, S. Zhang, S. Wang, D. N. Metaxas, Multispectral deep neural networks for pedestrian detection. *arXiv preprint arXiv:1611.02644*, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.02644>
- [86] J., Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi. You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision And Pattern Recognition* (pp. 779-788), 2016. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
- [87] J. Redmon, A. Farhadi, YOLO9000: better, faster, stronger. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision And Pattern Recognition*, pp. 7263-7271, 2017. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.690>
- [88] J. Redmon, A. Farhadi, Yolov3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>
- [89] A. Asvadi, L. Garrote, C. Premebida, P. Peixoto, U. J. Nunes, Multimodal vehicle detection: fusing 3D-LIDAR and color camera data. *Pattern Recognition Letters*, 115, 20-29, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.04.011>
- [90] H. Wang, X. Lou, Y. Cai, Y. Li, L. Chen, Real-time vehicle detection algorithm based on vision and lidar point cloud fusion. *Journal of Sensors*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8473980>
- [91] J. Dou, J. Fang, T. Li, J. Xue, Boosting cnn-based pedestrian detection via 3d lidar fusion in autonomous driving. In *Image and Graphics: 9th International Conference, ICIG 2017, Shanghai, China, September 13-15, 2017, Revised Selected Papers, Part II 9*, pp. 3-13, Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71589-6_1
- [92] J. Han, Y. Liao, J. Zhang, S. Wang, S. Li, Target fusion detection of LiDAR and camera based on the improved YOLO algorithm. *Mathematics*, 6(10), 213, 2018. <https://doi.org/10.3390/math6100213>
- [93] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C. Y. Fu, A. C. Berg, Ssd: Single shot multibox detector. In *Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, 11–14, Proceedings, Part I 14*, pp. 21-37, Springer International Publishing, October 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
- [94] J. Kim, J. Choi, Y. Kim, J. Koh, C. C. Chung, J. W. Choi, Robust camera lidar sensor fusion via deep gated information fusion network. In *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1620-1625, IEEE, June 2018. <https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500711>
- [95] Y. L. Hou, Y. Song, X. Hao, Y. Shen, M. Qian, H. Chen, Multispectral pedestrian detection based on deep convolutional neural networks. *Infrared Physics & Technology*, 94, 69-77, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.08.029>
- [96] Z. Li, L. Yang, F. Zhou, FSSD: feature fusion single shot multibox detector. *arXiv preprint arXiv:1712.00960*, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.00960>
- [97] C. Y. Fu, W. Liu, A. Ranga, A. Tyagi, A. C. Berg, Dssd: Deconvolutional single shot detector. *arXiv preprint arXiv:1701.06659*, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.06659>
- [98] Y. Lee, T. D. Bui, J. Shin, Pedestrian detection based on deep fusion network using feature correlation. In *2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, pp. 694-699, IEEE, November 2018. <https://doi.org/10.23919/APSIPA.2018.8659688>
- [99] Y. Zhao, R. Govindan, D. Estrin, Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02)*, IEEE, Orlando, pp. 356-362, 2002. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2002.993521>





Per- ve Polifloroalkil maddelerin (sonsuz kimyasalların) çevredeki kalıcılığı, yayılımı, birikimi ve sağlığa etkileri

Persistence, distribution, accumulation and health effects of forever chemicals (Per- and Polyfluoroalkyl Substances) in the environment

Meral Yurtsever^{1,*} 

¹ Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya Türkiye

Öz

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS) her alanda yaygın kullanılan ve yüksek kararlılıkları nedeniyle de çevrede kalıcı halde biriken sentetik kimyasallardır. Florlanmış hidrofobik bir kuyruk ve hidrofilik bir fonksiyonel grup içeren kısa ve uzun zincirli bileşikler sayesinde yapısal olarak çok çeşitli olan bu maddeler, yağ ve su itici özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel ve tüketici ürününde yer almaktadır; ancak canlılarda biyobirikim ve toksisite riskleri taşımaktadır. Küresel ölçekte 4700'den fazla türü üretilmiş olan PFAS'ların uzun zincirli türleri kısa zincirli türler göre daha kalıcıdır, ancak iki grubunda oluşturabileceği toksik riskler benzer olabilmektedir. 1940'lardaki ilk üretiminden bu yana çevresel ortamlarda (hava-su-toprak-biyota) birikmeye başlayan, bitkilerde ve hayvanlarda biyokümüle olabilen PFAS'ların, insan sağlığı üzerinde kanser, hormonal bozukluklar ve bağışıklık sistemi üzerinde olumsuz etkiler sergilediği anlaşılmıştır. Bu nedenle PFAS'ların kontrolü ve çevresel izleme stratejilerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. PFAS'ların tespitinde, çevreden uzaklaştırılmasında ve kontrolünde dikkatle ele alınması gereken birçok zorluk bulunmaktadır. Gelecekte sürdürülebilirlik açısından, öncelikle mevcut PFAS üretimi sınırlandırılıp tüketim alışkanlıkları çevre dostu ürünlere kaydırılarak PFAS'ların kaynağa azaltılması gereklidir. PFAS'ların ölçülmesiyle ilgili analitik tekniklerin küresel ölçekte yaygınlaşması ve geliştirilmesi, PFAS'ların ve yan ürünlerinin izlenmesi, maruziyet ve toksisite seviyelerinin ortaya çıkarılması, risk değerlendirmelerinin yapılması, PFAS'ların kaynaklarından bertarafına kadar her kademede kontrol sağlanarak yönetilmesi, bu sonsuz maddelerin gelecekteki etkilerinin anlaşılabilmesi ve uygun şekilde kontrol edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, PFAS'ların çevredeki kalıcılığını, hareketliliğini, taşınım ve birikimini ele alarak insan sağlığı üzerindeki potansiyel riskleri ve bu doğrultuda alınması gereken izleme ve kontrol önlemlerinin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Ekotoksik, Hareketlilik, Kalıcı kirlenmeler, Oleofobik, PFAS.

Abstract

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are widely used synthetic chemicals that accumulate persistently in the environment due to their high stability. These substances, which are structurally diverse thanks to their short and long-chain compounds containing a fluorinated hydrophobic tail and a hydrophilic functional group, are used in many industrial and consumer products due to their oil and water repellent properties; however, they carry bioaccumulation and toxicity risks. More than 4700 types of PFASs have been produced globally and long-chain types are more persistent than short-chain types, but the toxic risks they may pose in both groups may be similar. Since their first production in the 1940s, PFASs, which have begun to accumulate in environmental compartments (air-water-soil-biota) and can bioaccumulate in plants and animals, have been understood to have adverse effects on human health, such as cancer, hormonal disorders, and the immune system. Therefore, the control of PFASs and the development of environmental monitoring strategies have gained importance. There are many challenges in detecting, removing and controlling PFASs from the environment that need to be carefully addressed. For future sustainability, PFASs need to be reduced at source, primarily by limiting current PFAS production and shifting consumption patterns towards environmentally friendly products. It is of great importance for understanding and appropriately controlling the future impacts of these forever substances that analytical techniques for measuring PFASs become widespread on a global scale, that PFASs and their by-products are monitored, exposure and toxicity levels are revealed, risk assessments are made and PFASs are managed by providing control at every level from their sources to their disposal. This study addresses the persistence, mobility, transport and accumulation of PFASs in the environment and highlights the potential risks to human health and the importance of monitoring and control measures to be taken accordingly.

Keywords: Ecotoxic, Mobility, Persistent pollutants, Oleophobic, PFAS.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mevci@sakarya.edu.tr (M. Yurtsever)

Geliş / Received: 22.08.2024 Kabul / Accepted: 19.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1537421

1 Giriş

Sonsuz kimyasallar olarak adlandırılan Per-ve Polifloroalkil Maddeler (PFAS'lar), yüksek kararlılık ve direnç gösteren florokarbon zincirleri içerir; bu zincirler, karbon ve flor atomları arasındaki çok güçlü kovalent bağlar nedeniyle kimyasal ve termal bozunmaya karşı son derece dayanıklıdır [1]. Bu yapısal özellikler, PFAS maddelerini endüstriyel işlemlerde ve çeşitli günlük kullanımlarda agresif kimyasallara ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı kılmaktadır.

İlk olarak 20. yüzyılın ortalarında piyasaya sürülmelerinden bu yana PFAS'lar [2], yangın söndürme köpükleri, yapışmaz pişirme kapları, su itici, yağ itici ve leke tutmayan kumaşlar gibi birçok endüstriyel ve tüketici ürününde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Tüm PFAS türevi maddeler, endüstriyel uygulamalarda, özellikle de su ve yağ itici (oleofobik) özelliklere sahip ürünlerin üretiminde kullanılır. Oleofobik özelliklere sahip bir madde, yağa karşı direnç gösterir veya yağı iterek yüzeyinden uzaklaştırır [3, 4]. Oleofobik özellikler, genellikle su, kir ve diğer kirleticilerin yüzeye yapışmasını önlemek amacıyla malzemelerin kaplanması veya işlenmesinde kullanılır. Oleofobik özellikler, özellikle giyim, dış cephe kaplamaları, elektronik cihazlar gibi çeşitli endüstriyel ve tüketici ürünlerinde tercih edilmektedir. Bu özellik, yüzeylerin temiz kalmasına ve yağ bazlı lekelerin daha az yapışmasına yardımcı olmaktadır.

PFAS, flor-karbon bağlarının varlığı ile karakterize edilen geniş bir sentetik kimyasallar sınıfını temsil etmektedir. PFAS'ın bozulmaya karşı direnci ticari ve endüstriyel faydalar sunarken, aynı kalite onların çevrede her yerde bulunmasına, biyolojik birikme eğilimine ve insan ve diğer hayvanların doku ve sıvılarında kalıcı olmasına yol açmıştır. PFAS'ların çevre ve sağlık üzerindeki riskleri, 2000'li yılların başında yapılan toksikolojik çalışmalar ve epidemiyolojik verilerle netleşmeye başlamış olup, bu maddelerin kanserojenik, endokrin bozucu etkileri gibi çoklu sağlık tehlikeleri içerdiği belirlenmiştir [5]. İnsanların ve diğer canlıların aynı anda çeşitli PFAS türüne maruz kaldığı bilinmekle beraber bu maruziyetlerin dozları ve kümülatif etkileri halen belirsizliğini korumaktadır [6].

Günümüzde çevresel ortamlar tüm kirleticilerin biriktiği bir yutak gibidir ve PFAS'lar da çevrede kimyasal, biyolojik ve fotolitik bozulmaya direnen 'sonsuz kirleticiler' olarak su, toprak ve biyolojik sistemlerde kalmaktadır [7]. Potansiyel tehlikeleri anlaşıldıktan sonra bazı PFAS türüleri, belli ölçüde sınırlandırılmış olsa da, PFAS'ların çevresel dayanıklılık, biyobirikim, hareketlilik ve toksisite riskleri halen devam etmektedir. Bu çalışmanın amacı, sonsuz kimyasallar olarak bilinen (forever chemicals) per- ve polifloroalkil madde'lerin çevredeki yayılımını, hareketliliğini, birikimini, kalıcılığını ve sağlığa etkilerini ilgili araştırma örnekleriyle vurgulayarak, potansiyel riskleri ortaya koymaktır.

2 Uzun ve kısa zincirli PFAS'ların sınıflandırılması ve kalıcılıkları

Aşağıda Şekil 1'de PFAS'ların küresel ölçekte genel olarak sınıflandırılmaları ve pratik şekilde isimlendirilmeleri konusunda ortak kabul gören bir terminoloji sunulmuştur.

PFCA'ların, PFSA'ların ve bunların öncüllerinin farklı türlerini ayırt etmek için PFAS'larla ilgili olarak "Uzun zincirli" ve "Kısa zincirli" terminolojisi kullanılır [8]. Uzun zincirli PFAS'lar, genellikle karbon zincirlerinde 8 veya daha fazla karbon atomu içeren bileşiklerdir ($C \geq 8$), bu nedenle kısa zincirli PFAS'lara ($C < 8$) göre çevrede daha kalıcıdır. Çünkü, uzun karbon zincirleri ve florokarbon bağları nedeniyle, biyolojik sistemlerde zor ayrışır ve çevresel şartlarda daha az bozunurlar. PFOA ($C_8HF_{15}O_2$), PFOS ($C_8HF_{17}O_3S$), PFNA ($C_9HF_{17}O_2$), PFDA ($C_{10}HF_{19}O_2$), PFDaA ($C_{12}HF_{23}O_2$) ve PFHxDA ($C_{16}HF_{31}O_2$) gibi bileşikler uzun zincirli PFAS'lar kategorisindedir [9].

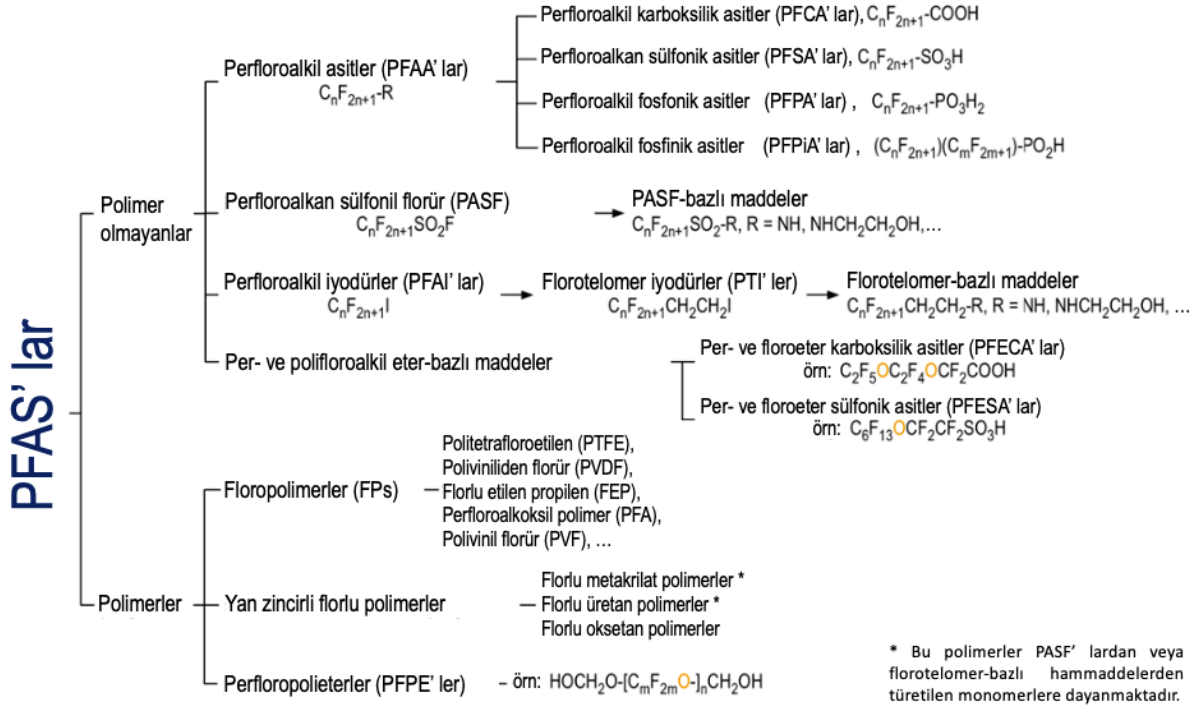
"C8" terimi, genellikle per- ve polifluorlu alkil maddeler (PFAS'lar) ile ilişkilidir ve özellikle Perfluorooktanik Asit (PFOA) gibi sekiz karbonlu ($CF_3(CF_2)_6COOH$) PFAS bileşiklerini ifade eder [10]. C8 ve bu tür PFAS bileşikleri çevresel direnci (persistansı) ile biyolojik birikme potansiyeli nedeniyle çeşitli endişelere yol açmaktadır [11]. Bu maddelerin çevresel ve sağlık etkileri nedeniyle birçok ülkede düzenlemelere tabi tutulmuş ve bazı durumlarda kullanımları sınırlandırılmıştır. GenX, ADONA ve F-53B gibi maddeler; perfluorooktanik asit (PFOA) ve perfluorooktanesülfonik asit (PFOS) gibi PFAS'lara alternatif olarak geliştirilen kısa zincirli ikame analoglardır [12-15]. GenX kimyasalı, PFOA ve benzeri perfluorooktanik asitlere alternatif olarak geliştirilmişken; ADONA ve F-53B ise PFOS'un yerini almaya yönelik olarak tasarlanmıştır.

Florotelomer ise perfluorooktil (C_8F_{17} -) kimyasal türüdür. Telomerizasyon işlemi, elektrokimyasal florlamadan daha karmaşık ve çalıştırılması daha zor olan, ancak daha yüksek saflıkta nihai ürünün daha yüksek verimini üreten PFAA'ların üretimine yönelik bir endüstriyel işlemidir [16]. Bu teknikle en yaygın olarak akrilatlar (FTA'lar), florotelomer olefinler (FTO'lar) ve florotelomer alkoller (FTOH'lar) gibi florotelomer maddeleri üretilir. Çok az dallanmaya sahip veya hiç dallanma olmayan doğrusal zincire sahip PFAS, telomerizasyon işlemiyle üretilir ve bu işlem esas olarak çift sayılı, düz karbon zinciri izomerleri verir.

3 Çevresel maruziyet: Yaygınlık, kalıcılık, birikim ve hareketlilik

PFAS kirliliği, toprak, su, hava ve biyolojik sistemlerde geniş bir dağılım göstermeye başlamıştır. PFAS'lar küresel ölçekte akarsular, göller, yeraltı suları, kıyıları, açık deniz suları, kar ve yağmur gibi birçok çevresel örnekte tespit edilmiştir. Bazı PFAS türlerinin binlerce yıllık kalıcılığa sahip olduğu tahmin edilmektedir [17]. PFAS'ların çoğunun molekül ağırlığı 300 g/mol - 700 g/mol arasındadır. Tüm bu bileşikler arasında PFOA ve PFOS çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu nedenle sularda potansiyel bir kirletici olmaya çok yatkındır [18].

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS' lar)



Şekil 1. PFAS' ların genel sınıflandırması

Florotelomer alkoller (FTOH'ler) [19, 20], perflorokarboksilik asitlerin (PFCA'lar) öncülleridir ve bu nedenle su matrislerinde yaygın olarak tespit edilirler; bu da sonuçta içme suyu kaynaklarında PFAS kirliliğine ve dolayısıyla potansiyel bir insan maruziyeti kaynağına işaret eder. Toksik, kalıcı, biyobirikimli ve hareketli olduğu iyi bilinen bazı düşük molar kütleli per ve polifloroalkil maddelerin (PFAS'ler) aksine, floropolimerler (FP'ler) suda çözünmez, biyoinert ve dayanıklıdır [21]. Everest Tepesi'nde yapılan bir araştırmada [22], 8 kar örneğinin dördünde PFOS tespit edilmiştir, en yüksek konsantrasyonlar, Everest Ana Kampı (26.14 ng/L), Kamp II (10.34 ng/L) ve Lobuche dağındaki (1.10 ng/L) kar numunelerinde tespit edilmiştir. PFOA, Everest Ana Kampı (2.14 ng/L), Kamp I (5.09 ng/L) ve Kamp II (1.11 ng/L) dahil olmak üzere 4 kar örneğinde bulunmuştur. PFHxA, Ana Kamptan (3.38 ng/L) alınan bir kar örneğinde ve Everest Balkonunda (0.63 ng/L) eser miktarda bulunmuştur.

PFAS moleküllerinin fonksiyonel baş grupları (örneğin, -COOH ve -SO₃H) tipik olarak elektrostatik bağlanma ve hidrofobik etkileşimler yoluyla pozitif yüklü adsorbentler tarafından adsorbe edilir [23]. Perfloroalkil maddenin derin denizlere ulaşmasını araştıran bir çalışmada, Kuzeybatı Akdeniz'in derinliklerine batan partiküllerde perfloroalkil maddeler (PFAS) tespit edilmiş ve bu maddelerin kirleticilerin derin denizlere aktarılmasında vektör olarak rol oynadığı bildirilmiştir [24]. Uzun zincirli PFOA, PFOS ve PFNA maddelerinin ölçülebilir konsantrasyonlarının ve kısa zincirli PFHxA ve PFBA maddelerinin önemli ölçüde yüksek konsantrasyonlarının bulunması, partikül madde

üzerine emilen bu bileşiklerin okyanusun iç kısımlarına hızlı ve doğrudan aktarıldığını göstermektedir. Uzun zincirli ve kısa zincirli PFAS arasındaki rekabetçi adsorpsiyonunun ve granül aktif karbon (GAC) filtrelerinden kısa zincirli PFAS'ın erken atılımına yol açan mekanizmaların incelendiği bir çalışmada [25], en dış bölgelere adsorbe edilen kısa zincirli PFAS'ın, uzun zincirli PFAS tarafından desorbe edildiği gözlemlenmiş, ortama eklenen Na⁺, Ca²⁺ gibi katyonların ise kısa zincirli PFAS emilimini daha da inhibe ederken, uzun zincirli PFAS sorpsiyonu üzerinde daha az etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır.

Gezegenin çeşitli bölgelerinde, büyük yerleşim merkezlerinden uzak bölgelerinde bulunanlar dahil olmak üzere hem deniz hem de kara organizmalarında PFAS'ların varlığı kanıtlanmıştır [26, 27]. Hayvanlar konusunda yapılmış çalışmalar çoğunlukla balıklardaki ve diğer sucul canlılardaki PFAS konsantrasyonlarını göstermektedir [28, 29], çalışmaların %13'ü karasal iç bölgelerdeki yabani hayvanlar üzerinedir. PFAS incelenen yaban hayatı türleri veya gruplarında foklar, deniz kuşları, levrek, çipura ve martılar gelmektedir. PFAS ve diğer KOK'lar gibi kirleticieye maruz kalmanın işlevsel sonuçlarını (örn. hormonlar ve tiroid) araştıran çalışmalar ise daha az sayıdadır ve çoğunlukla kuşlar (ve bazı kuş tüylerinde) üzerine yapılmıştır [30]. Ayrıca kutup ayılarında [31] ve nesli tehlike altında olan katil balinalarda da [32] PFAS konsantrasyonlarının tespit edildiği çalışmalar bulunmaktadır. Somon, ton balığı, morina, berlam balığı, sardalya, hamsi ve dil balığından elde edilen balık kaslarında ve yedi farklı deniz ürünü türü (mürekkep balığı, ahtapot,

kalamar, karides, istakoz, kerevit ve midye) üzerinde PFAS'ların incelendiği bir çalışmada, balık numunelerinde $0.014 - 0.818 \text{ ng g}^{-1}$ (yaş ağırlık) PFAS tespit edilmiştir [33]. Sardalya, hamsi ve dil balığında en yüksek PFAS seviyeleri bulunmuş ve incelenen diğer sucul ürün türleri için PFAS seviyelerinin $0.03 - 36.7 \text{ ng g}^{-1}$ (kuru ağırlık) arasında değiştiği bildirilmiştir.

Su-karasal besin zinciri boyunca PFAS taşınımının araştırıldığı bir çalışmada, hem karada hem de suda yaşayan makroomurgasızlarla beslenen ağaç kırlangıcı yavruları incelenmiştir [34]. Çalışmada, havanın, karasal omurgasızların ve kırlangıçların PFAS profillerinde PFOS'un baskın olduğu görülmüştür. Perflorooktanesülfonik asit (PFOS), çoklu uzun zincirli perflorokarboksilik asitler [perflorononanoik asit (PFNA), perflorodekanoik asit (PFDA), perflorotridekanoik asit (PFTrDA)] ve perflorooktan sülfonamid öncüllerinin havadan ağaç kırlangıçlarına biyoakümüle olduğu tahmin edilmiştir. PFOS havadan karasal omurgasızlara; PFOS, PFDA ve perflorooktan sülfonamidoasetik asitler (FOSAA'lar) sudan sucul omurgasızlara biyoakümüle olmuştur. Sonuçlar, PFOS'ların, hem karasal hem de suda yaşayan omurgasızlardan ağaç kırlangıçlarına doğru biyomagnifikasyonunu ve PFDA ve FOSAA'ların da suda yaşayan omurgasızlardan ağaç kırlangıçlarına kadar biyomagnifikasyonunu göstermiştir.

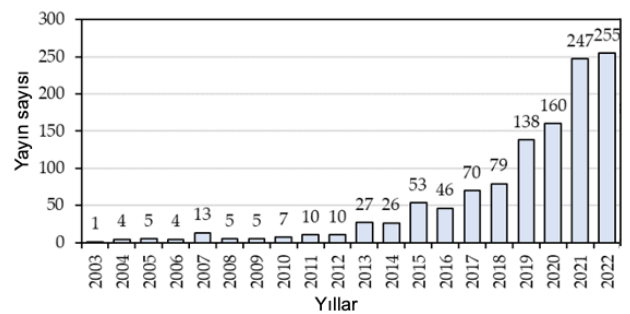
Hayvanlardaki PFAS konsantrasyonlarının yanı sıra [35], literatürdeki çalışmalar topraktaki PFAS konsantrasyonları ile bitkilerdeki (karasal ve sucul bitkiler) biyoakümüleyon arasında doğrudan bir korelasyon olduğunu göstermektedir [36-38]. Bitki tarafından PFAS alımı büyük ölçüde zincir uzunluğu, fonksiyonel grup, bitki türü ve organ ile değişmektedir [39]. Birçok bitkinin (buğday, mısır, tahıllar, patates, domates, ayçiçeği, turp, havuç, lahana, marul, soğan, kereviz, kabak, karnabahar, biber, pirinç, şeker kamışı, şeker pancarı, hardal, kenevir ve çeşitli ağaçlar) tohum, gövde, kök, sürgün, yaprak ve kabuk kısımlarında PFAS incelemeleri yapılmıştır. Bitkilerde PFAS birikiminde toprak değişikliğine göre önemli farklılıklar bulunmuştur, bu da toprak organik maddesi ile özel bir etkileşim olduğunu düşündürmektedir. Bazı PFAS'lar, özellikle kısa zincirli PFAS'lar kolayca alınır ve yüksek konsantrasyonlarda metabolik tepkilere ve fitotoksik etkilere neden olabilir. Köklerden sürgünlere PFAS translokasyonu hem aktif hem de pasif taşıma mekanizmaları yoluyla gerçekleşir.

Hem PFAS alımı hem de etkileri türler arasında ve türler içinde değişiklik gösterir [40]. Çin'deki bir mega florokimyasal sanayi parkının yakınındaki toprak, yağış, yüzey suyu ve yeraltı suyundaki toplam PFAS konsantrasyonunun sırasıyla $641 \mu\text{g/kg}$, $4.86 \mu\text{g/L}$, $1860 \mu\text{g/L}$ ve $273 \mu\text{g/L}$ 'ye ulaştığı bildirilmiştir [41]. Çevredeki bu PFAS'lar üretim alanlarının çevresindeki bitkilere geçmekte ve biyolojik olarak birikebilmektedir. Örneğin, florokimyasal sanayi bölgelerinin çevresinde yetiştirilen tarımsal ürünlerin yüksek seviyelerde PFAS içerdiği; toplam konsantrasyonun sebzelerde $87 \mu\text{g/kg}$ yaş ağırlık, buğday tanelerinde $480 \mu\text{g/kg}$ kuru ağırlık ve mısır tanelerinde $59 \mu\text{g/kg}$ kuru ağırlığa kadar çıktığı tespit edilmiştir. Bulunan

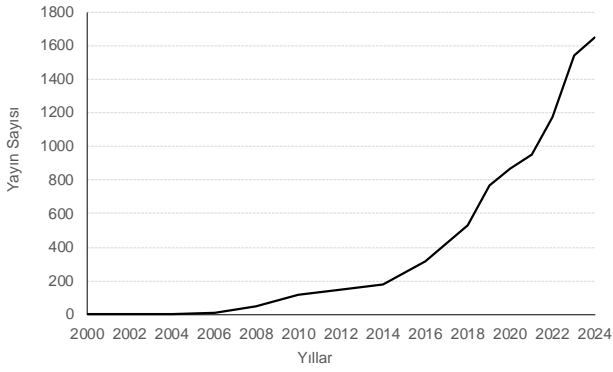
PFAS kaynakları, yakındaki endüstriyel deşarjlarla ilişkilidir. Bunlara ilaveten Jin vd. [42] yaptıkları çalışmada, florokimyasal üretim tesislerinin yakınından toplanan ağaç kabuğu ve yapraklarının da PFAS'larla kirlendiğini tespit etmiş ve bu kontaminasyonun sebebinin havadaki PFAS'ların bitkiler tarafından emilmesi olabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Yeni bir çalışmada, Fransa'da 14 farklı lokasyondan toplanan yağmur suyu örneklerinde 52 PFAS analiz edilmiş ve yağmur suyu örneklerinde PFAS'ın varlığı ortaya çıkarılmıştır [43]. Çalışmada özellikle eser miktardaki PFAS'ların analizi dikkatle ele alınmış (miktar belirleme limiti, LOQ) ve toplanan yağmur suyu miktarına bağlı olarak, PFAS konsantrasyonları ya doğrudan enjeksiyonla ya da katı faz ekstraksiyonundan (SPE) sonra analiz edilmiştir. Ölçülen PFAS'lar arasında üç bileşiğin (perflorononanoik asit, perfloroundekanoik asit ve perfloroheksanoik asit) önemli olduğu bildirilmiştir. Özellikle perflorooktananoik asit (PFOA) ve perflorooktan sülfonik asit (PFOS) konusu fazla çalışılmış ve bu kimyasalların çevre ve insan sağlığına olan etkileri ortaya konulmuştur. PFAS'ların toksisitesi konusunda kısıtlı bazı bilgilerin de, günümüzde özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar sayesinde hızla gelişmekte olduğu görülmektedir [27, 44-46]. PFAS'larla ilgili mevcut kanıtlar [47], birçok yeni ve yeni ortaya çıkan PFAS'lara maruz kalmanın, yerini aldıkları PFAS'larla benzer olumsuz etkiler de dahil olmak üzere, farklı etki mekanizmalarıyla olumsuz sağlık ve çevresel etkilerle sonuçlanabileceğini göstermektedir.

2003 yılında PFAS'ların çevresel bir kirlenici madde olarak ele alındığı ilk çalışma [48] ile birlikte PFAS araştırmaları artmaya başlamıştır. Özellikle 2019 yılı itibarıyla daha fazla ülke, PFAS izleme raporlarını yayınlamaya başlamış ve böylece literatürdeki çalışmalar ivmelenmiştir. Şekil 2(a)' da sularda PFAS izlenmesine yönelik yöntem ve teknolojileri içeren çalışmalara ait 2003-2022 yılları arası Scopus verileri görülmektedir [49]. PFAS'lar ile ilgili daha genel anahtar kelimelerle (perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler, perfloroalkil maddelerin değerlendirilmesi, PFAS'ların birikim toksisitesi, perfloroalkil ve polifloroalkil giderimi), 2000'den 2024'e (Ekim) kadar yayınlanmış (Scopus) toplam yayınlara ait bir grafik [50] ise Şekil 2.(b)' de verilmiştir.



Şekil 2. PFAS'larla ilgili yayınların yıllara göre artışı
(a) 2003-2022 arasında, sulardaki PFAS'ların tespiti ve izlenmesi ile ilgili yayınlar [49]



(b) 2000-2024 arasındaki, PFAS'lar ve genel risklerle ilgili yayımlar

Bu konudaki çalışmaların artış eğilimi, PFAS'ın çevresel izlenmesinin ve PFAS'larla ilgili temel verilerin oluşturulmasının oldukça önemli bir konu haline geldiğini göstermektedir.

4 Çevresel maruziyet: Yaygınlık, kalıcılık, birikim ve hareketlilik

PFAS'ların üstün özellikleri olarak bilinen bozunmaya karşı dirençleri, onların aynı zamanda da ekosistemde kalıcılığına, taşınımına, canlıların dokularında yüksek konsantrasyonlarda bulunmasına sebep olmaktadır. PFAS, 1999-2000 Ulusal Sağlık ve Beslenme İnceleme Araştırması'nda (National Health and Nutrition Examination Survey, NHANES) belirtildiği üzere, 1990'lardan bu yana kan örneklerinde serumda tespit edilmektedir [51, 52].

2017-2018 NHANES verilerine göre ABD' de, perflorooktanoik asit (PFOA), perflorooktansülfonik asit (PFOS) ve perflorheksansülfonik asit (PFHxS) örneklenen genel popülasyonun %99'undan fazlasında tespit edilmiştir; bu, PFAS'ın ABD nüfusunun hepsinde olmasa da çoğunda ölçülebilir seviyelerde mevcut olduğunu göstermektedir [53]. İnsan popülasyonlarında PFAS yarılanma ömürleri farklıdır; PFOA'nın eliminasyon yarı ömrünün 1.48 - 5.1 yıl, PFOS'un 3.4 - 5.7 yıl ve PFHxS'nin insanlarda 2.84 - 8.5 yıl olduğu tahmin edilirken [54], daha kısa zincirli PFAS'ın eliminasyon yarı ömrü daha kısadır. Örneğin perflorobütanoik asidin (PFBA) 80 saatlik bir eliminasyon yarı ömrüne sahip olduğu tahmin edilmektedir. PFAS türevlerinin yarılanma ömürlerinin ($t_{1/2}$) tahmin edilmesi, çevrede ve insanlarda kalıcılıklarını, toksisitelerini ve etki mekanizmalarını değerlendirebilmek açısından oldukça önemlidir.

Abraham ve Monien [55] tarafından yapılan bir çalışma, PFOA içeren bir güneş kreminin cilde uygulanması sonucunda, kremde bulunan PFOA'nın cilt bariyerini geçerek insan vücuduna, dolayısıyla da kana geçtiğini (%1.6 PFOA) göstermiştir. Kullanılan PFOA'nın organizmada tahmini 1.8 yıllık bir yarı ömrü bulunmaktadır. Çalışmalar, gıda ambalajlarındaki PFAS'ın gıdalara sızabildiğini ve tipik olarak PFAS içeren ambalajlarda satılan gıda türlerini düzenli olarak tüketen kişilerin kan testlerinde daha yüksek PFAS seviyelerine rastlandığını göstermiştir [56, 57].

Daha sağlıklı bir dünya hedefleyen küresel bir ağ olan IPEN tarafından Aralık 2023' te yayınlanan bir araştırmada,

Asya, Afrika, Avrupa, Kuzey Amerika ve Latin Amerika ve Karayipler'deki on yedi ülkeden satın alınan tek kullanımlık, kağıt, karton ve bitki bazlı kalıplanmış fiber gıda kapları ve sofraya takımlarında küresel olarak yasaklanmış maddeler de dahil olmak üzere toksik PFAS kimyasalları tespit edilmiştir [58].

Alden Wicker'ın [59] "Boyamak İçin: Toksik moda bizi nasıl hasta ediyor ve nasıl mücadele edebiliriz" isimli kitabı, kıyafetler aracılığıyla kimyasallara maruziyeti anlatmaktadır. Çünkü egzersiz kıyafetleri gibi, özellikle de "ter tutmayan" veya "su itici" olarak pazarlanan kıyafetler, genellikle kanserojen ve kalıcı olan PFAS içerir. Kızartma tavalarından [60] tuvalet kağıtlarına [61] kadar her üründe yaygın olarak kullanılması nedeniyle hemen hemen her yerde PFAS konsantrasyonlarına rastlanmaktadır, ancak belirli yüksek performanslı, suya dayanıklı kaplamalarla işlenmiş giysilerde, Gore-Tex malzemelerde daha yüksek konsantrasyonlarda PFAS bulunabilir [59].

Günümüzde insanlar PFAS'lara doğrudan veya dolaylı olarak birden fazla yolla maruz kalabilir. Nispeten her bir yolun katkısı, maruz kalma sıklığına, maruziyet konsantrasyonuna ve alım oranına bağlı olarak değişir. PFAS'lara maruziyetin başlıca kaynakları içme suyu, gıda ve hava veya toz yoluyla olurken, en yüksek çevresel konsantrasyonlar kirlenmiş sahaların yakınında gözlenmektedir. Birçok ülke, sularındaki PFAS seviyelerini bildirmeye başlamıştır. Japonya ve Gana'daki musluk suyu ve kuyu suyu örneklerinde tespit edilen PFOA konsantrasyonları sırasıyla 100 ng/L ve 800 ng/L'ye ulaşmıştır, Gana ve İspanya'da PFOS konsantrasyonlarının sırasıyla 100 ve 40 ng/L olduğu tespit edilmiştir [62, 63]. Barselona'da (İspanya) musluk suyunda ölçülen 35 hedef PFAS arasında yüksek olarak tespit edilenler, perfloropentanoat (PFPeA: 5.8 ng/L), perfloroheptanoat (PFHpA: 3.4 ng/L), perflorobütan sülfonat (PFBS: 8.3 ng/L), perflorooktanesülfonik asit (PFOS: 13.0 ng/L), perfloroheksanoattır (PFHxA: 12.0 ng/L) [64]. Çin'de yapılmış bir çalışmadaki PFOS (368.134 ng/L) ve PFOA (2115.204 ng/L) konsantrasyonları nispeten yüksek bulunmuştur [65].

Farklı gıda kategorilerindeki PFAS konsantrasyonlarını karşılaştıran bir çalışmanın sonuçları, ette yüksek içeriğe sahip PFOS (6.255 ng/g) ve PFOA (4.392 ng/g) gibi PFAS türlerinin olduğunu ve bunu deniz ürünlerinin (PFOA: 2.496 ng/g ve PFOS: 2.100 ng/g) takip ettiğini bildirmektedir [65]. Meyve ve sebzelerde ise daha yüksek oranda bulunanlar PFBA (40.975 ng/g) ve PFBS (2.846 ng/g) olup, yumurtalarda da azımsanmayacak oranda PFBA (33.223 ng/g) ve PFBS (26.553 ng/g) tespit edilmiştir. Süt ürünlerindeki en yüksek PFAS içeriği PFOS (0.355 ng/g) ve PFBA (0.130 ng/g) olmuştur. Anne sütünde ise içeriği en yüksek olan PFAS'lar PFOA (284.434 ng/L) ve PFOS (50.160 ng/L) olarak belirlenmiş olup, bu durum örnekleme yerinin kimyasal bir bölgede olmasıyla ilişkilendirilmiştir. İncelenen gıdalardaki PFAS değerleri Tablo 1'de sunulmuştur [65].

PFAS'ların kalıcılığı, toksisitesi ve riskler anlaşıldıktan sonra; bu maddelerin alternatiflerine yönelik endüstriyel girişimler, üretim ve kullanıma ilişkin düzenleyici

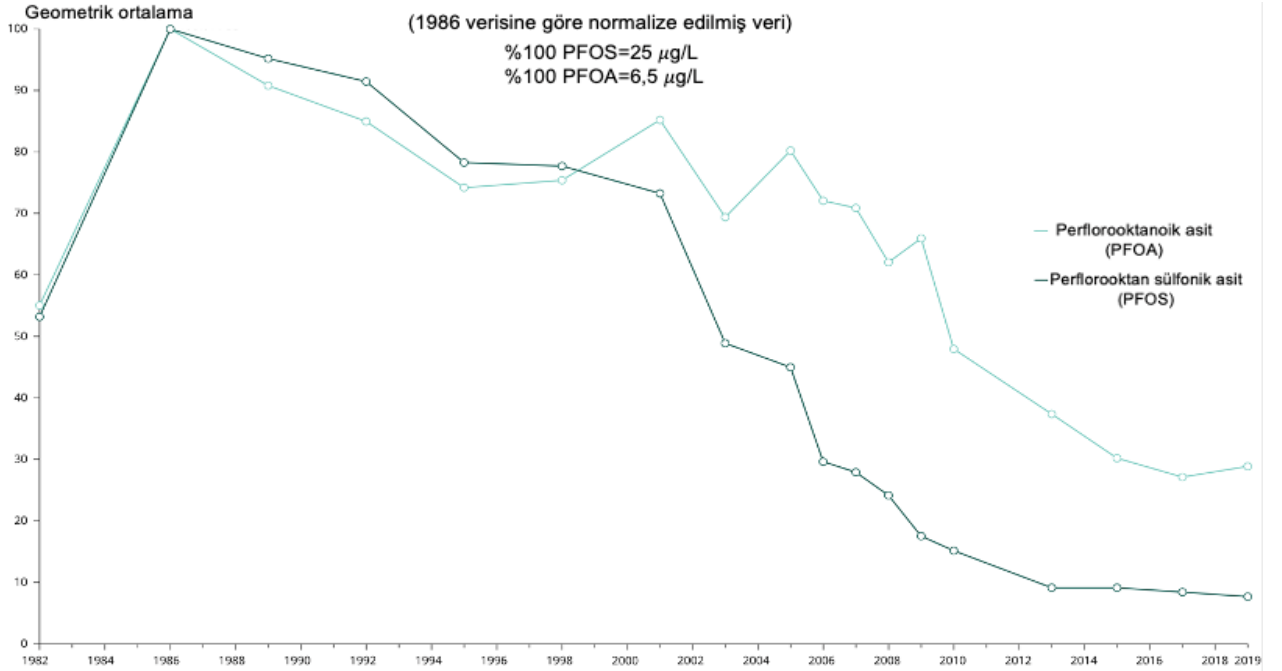
kısıtlamalar ve alınan risk yönetimi tedbirleri, insanların PFAS maruziyetinde değişikliklere yol açmıştır [6]. 2006 yılında, PFOS'un pazarlanması ve kullanımı AB'de Tehlikeli Maddeler Direktifi uyarınca kısıtlanmıştır. 2009'da, PFOS'un, Stockholm Sözleşmesi kapsamında ortadan kaldırılması hedeflenen KOK'lar listesine eklenmesi (PFOA, 2019'da eklendi), 2012 itibarıyla PFAS türevi kimyasalların REACH çerçevesine dahil edilmesi gibi düzenlemeler neticesinde, günümüzde hem PFOS hem de PFOA, KOK (POPs) Yönetmeliği kapsamında da kısıtlanmıştır.

Şekil 3'teki grafikte 1982'den 2019'a kadar Almanya'daki genç yetişkinlerden alınan kan örneklerindeki PFOS ve PFOA'nın seviyeleri görülmektedir [66]. Almanya'daki gençler üzerinde yapılan araştırmanın sonuçları, bu değişen kullanım kalıplarının, kısıtlamaların ve risk yönetimi

önlemlerinin, insanların PFOS ve PFOA'ya maruziyetini nasıl azalttığına dair önemli kanıtlar sunmaktadır [66]. Kan örneklerinde rastlanan PFAS'ların yaklaşık 37 yıllık durumunu özetleyen bu grafikte, özellikle risklerin anlaşılması ve kısıtlamaların getirilmesiyle birlikte Alman gençlerde PFOS ve PFOA seviyelerinin, 1986'daki en yüksek seviyelere kıyasla sırasıyla %90 ve %70'e kadar azaldığı görülmektedir. Ancak sonuçlar, kandaki PFOA ve PFOS'ın azalma eğilimini gösterse de, kalıcı kimyasalların yasaklandıktan uzun süre sonra bile nasıl sorunlu şekilde halen kaldığının da kanıtıdır. PFAS'lar serumda albümine bağlı olarak taşınırlar. Uzun süreli bir maruziyet olması durumunda PFAS'ların insan kanında tespit edilmesi kolay olmaktadır.

Tablo 1. Farklı gıda kategorilerindeki PFAS konsantrasyonları

Gıdalar	birim	PFOS	PFOA	PFDA	PFHxA	PFNA	PFUnDA	PFDoA	PFHxS	6:2 Cl- PFESA	8:2 Cl- PFESA	PFBA	PFHPA'nın	PFTeDA	PFBS	PFPeA
Et	ng/g	6.255	4.392	0.009	-	-	-	-	-	0.012	-	-	-	-	-	-
Deniz ürünleri	ng/g	2.100	2.496	0.33	0.173	0.283	0.932	0.002	0.129	0.024	0.006	0.446	0.096	0.031	0.013	0.045
Sebze ve meyve	ng/g	0.063	0.401	0.1	0.098	0.017	-	-	0.185	-	-	40.975	0.138	-	2.846	0.91
Yumurta	ng/g	0.81	16.330	2.707	0.05	0.863	-	-	0.313	-	-	33.223	0.05	-	26.553	0.05
Süt ürünü	ng/g	0.355	0.061	0.004	0.044	0.000	0.01	0.004	0.03	-	-	0.13	0.01	0.01	0.01	0.05
Anne sütü	ng/L	50.160	284.434	10.290	6.137	12.684	9.745	1.602	7.555	17.546	0.88	7.384	2.195	-	0.77	1.449



Şekil 3. Almanya'daki gençlerde PFOS ve PFOA seviyeleri (1982-2019 yılları) [67, 68]

Günümüzde insanlarda yapılan epidemiyolojik çalışmalar çoğunlukla uzun zincirli PFAA'lar üzerine yoğunlaşmışken, sıçanlar üzerinde yapılan hayvan deneyleri, kısa zincirli PFAA'ların da benzer toksik etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, GenX'e maruz kalan farelerde karaciğer ve böbrek hasarı ve bağışıklık sistemi baskılanması gözlemlenmiştir [69, 70]. ABD Ulusal Toksikoloji Programı (NTP) raporları, hem PFBS'nin hem de PFHxA'nın, erkek ve dişi sıçanlarda tiroid hormonlarının azalması da dahil olmak üzere çok sayıda olumsuz etkiye sahip olduğunu bulmuştur [71]. Özellikle, kısa zincirli PFAA'larda gözlemlenen etkilerin, uzun zincirli PFAA'ya kıyasla daha büyük uygulanan dozlarda ortaya çıkabileceği belirtilmiştir. Maalesef insanların aynı anda birden fazla PFAS'a maruz kalması söz konusudur. Bu maruziyetlerin kümülatif etkileri konusunda ise yeterli araştırma bulunmamaktadır.

Floropolimer toksisite verilerini, insan klinik verilerini ve fiziksel, kimyasal, termal ve biyolojik verileri inceleyip değerlendiren çalışmalar, floropolimerlerin "düşük endişe verici polimerler" (PLC) olarak kabul edilmek üzere, yaygın olarak kabul edilen değerlendirme kriterlerini karşıladığını göstermektedir [72, 73]. Floropolimerlerin diğer polimerik ve polimerik olmayan PFAS'lardan belirgin şekilde farklı olduğu ve tehlike değerlendirmesi veya düzenleme amaçları doğrultusunda onlardan ayrılması gerektiği bildirilmiştir [72]. Floropolimerler, politetrafloroetilen (PTFE) üzerindeki toksikoloji çalışmalarının da gösterdiği gibi [72] biyolojik olarak kullanılabilir veya biyolojik olarak birikimli değildir (akut ve subkronik sistemik toksisite, tahriş, duyarlılaşma, implantasyonda lokal toksisite, sitotoksisite, in vitro ve in vivo genotoksisite, hemoliz, kompleman aktivasyonu ve trombojenite vb. çalışmalar).

PFAS'ın kalıcılığı ve her yerde bulunması, önemli halk sağlığı ve çevre endişelerine yol açmaktadır. Çalışmalar çeşitli PFAS bileşiklerini sağlıkta olumsuz etkilerle ilişkilendirmiştir. Bu maddeler karaciğer hasarı, tiroid hastalığı, obezite, doğurganlık sorunları, hormon baskılanması ve kanser gibi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir [27, 74, 75]. Perfloroalkil sübstitüentleri (PFAS) plasenta bariyerini geçebilir, en savunmasız gelişim döneminde fetüsü etkileyebilir. Maternal PFAS maruziyeti

ile fetüsün üreme hormonları arasındaki ilişkiyi araştıran bir çalışmada özellikle kısa zincirli PFAS'lara rahimde maruziyetin fetal üreme hormonları üzerindeki etkileri incelenmiştir [75]. Hamileliğin erken döneminde anne kan plazmasında iki kısa zincirli PFAS türü (perflorobütansülfonat, PFBS ve perfloroheptanoik asit, PFHpA) içeren 10 PFAS ve Göbek kordon kanında kemilüminesans kitleri kullanılarak dehidroepiandrosteron sülfat (DHEA-S), seks hormonu bağlayıcı globulin (SHBG), luteinize edici hormon (LH), folikül uyarıcı hormon (FSH) ve total testosteron (TT) seviyeleri ölçülmüştür. Kısa zincirli PFAS'ın üreme toksisitesinin ihmal edilemeyeceği vurgulanmıştır.

PFAS'lara mesleki maruziyet açısından hangi işçi gruplarının risk yaşayabileceğini araştıran bir çalışmada [76], profesyonel kayak malzemesi cilalayıcılarının ve itfaiyecilerin, florokimyasal üretim tesislerindeki çalışanlar ve PFAS ile kirlenmiş içme suyuna maruz kalmış bireyler kadar yüksek seviyelerdeki farklı PFAS'a maruz kalabileceği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra birçok meslek grubuyla ilgili olarak, insanların kanındaki serum-PFAS seviyesi verileri halen eksiktir ve bu alanlarda daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. İlaçlarda ve tıbbi ekipmanlarda da PFAS kullanılmasına rağmen, bu yollarla maruziyet hakkında da çok az bilgi bulunmaktadır [66].

5 Sürdürülebilir çevre için PFAS kirliliğinin izlenmesi ve kontrolü

Çevredeki PFAS kirliliğini önlemenin en temel yolu, üretim ve kullanım süreçlerinde ciddi bir kaynak azaltımı sağlamak ve çevre dostu alternatif ürünler ile kirlilik riskini minimize etmektir. Bunun için, PFAS içeren yanmaz-yapışmaz pişirme kapları gibi ürünlerin satış ve kullanımını azaltarak bunları seramik, metal, dökme demir vb. gibi diğer yeşil pişirme kaplarıyla değiştirmek, tekstil, metal ve gıda ambalajları üzerindeki floropolimer kaplamalardan kaçınmak ve alternatifleriyle (perfloro butil iyodür gibi) değiştirmek ve PFAS'ın çevreyi kirliletmesinin önemli bir kaynağı olarak bilinen yangın söndürme köpüklerinde PFAS kullanımını kaldırarak PFAS'sız ürünlere yönelmek gibi uygulamalar yapılabilir.



Şekil 4. Çevrede PFAS kirliliğinin yönetimine ilişkin gelecek yaklaşımları

John ve arkadaşları tarafından [77], PFAS'ların üretim kaynaklarından, gelecekteki etkilerine kadar akıbetini gösteren, temsili ve düzenleyici politikalar üzerine vurgu yapan bir çerçeve (Etkenler-Baskılar-Durum-Etki-Tepki) önerilmiştir. Gelecekte çevresel ortamlardaki PFAS kirliliğinin yönetimine ilişkin yaklaşımlar ve PFAS'ların gelecekteki etkilerini azaltmaya yönelik adımlar Şekil 4'te sıralanmıştır.

Kanun düzenleyiciler, ülkelerdeki gözlemlenen PFAS türlerinin tam listesini, kaynağını, kullanımını, kirlilik seviyelerini ve çevreye salınımlarını içeren eksiksiz bir risk yönetimi yaklaşımıyla hareket etmelidir. PFAS'ın kaynağından bertarafına kadar çeşitli seviyelerde kontrolünün sağlanarak yönetilmesi, maruziyet seviyelerinin ve topluluklar arasındaki toksisite seviyelerinin ortaya çıkarılması, risklerin kontrol edilmesi için eylem planlarının geliştirilmesine ve farklı PFAS bileşiklerinin insan sağlığı üzerindeki sağlık etkilerinin anlaşılmasına imkan sağlayacaktır. Konuyla ilgili uygun standartların geliştirilmesi ve risk değerlendirmelerinin yapılması, PFAS'ların gelecekteki etkilerinin anlaşılması ve uygun şekilde kontrol edilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Arıtma işlemleri sırasında, PFAS yan ürünleri oluşumu ve daha fazla sayıda kısa zincirli PFAS'ların salımı gibi önemli problemler oluşmaktadır. Tek tek arıtma süreçleri tam bir PFAS giderimi sağlayamadığından, günümüzde farklı arıtma proseslerinin ardışık bir süreçte birleştirilmesi ve uygun maliyetle giderim verimini artırıcı sinerjik yaklaşımlar denenmektedir [77-79]. Farklı oksidasyon sistemlerinin biyoremediasyon süreçleriyle birleştirilmesi, inşa edilmiş sulak alan sistemlerinin mikrobiyal yakıt hücresi yaklaşımlarıyla birleştirilmesi ve adsorpsiyon ve filtrasyon gibi pasif ayırma tekniklerinin diğer aktif giderim teknolojileriyle birleştirilmesi, etkili giderime yardımcı olabilecek hibrit sistemlerden bazılarıdır. Büyük ölçekli yaklaşımların ve daha ileri uygulamaların geliştirilmesi gerekli görünmektedir. Daha çevreci yaklaşımlar kullanarak yeni teknolojiler geliştirmek, sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlemeye yardımcı olabilir.

6 Sonuç

Günümüzde PFAS'lar hakkındaki araştırmalar giderek artmaktadır, ancak, PFAS'lara maruziyetle ilişkili sağlık etkilerinin belirlenmesi birçok nedenden dolayı zordur. Başlıca nedenler: Potansiyel olarak değişen etki ve toksisite seviyelerine sahip binlerce PFAS bulunması, ancak çalışmaların sınırlı olması ve çoğu çalışmada yalnızca daha iyi bilinen PFAS bileşiklerine odaklanılmasıdır. İnsanların PFAS türlerine farklı şekillerde ve hayatlarının farklı aşamalarında maruz kalabilmesi olasıdır. PFAS'ın türleri ve kullanımları zamanla değişmektedir, bu da bu kimyasallara maruz kalmanın nasıl oluştuğunu ve bunların insan sağlığını nasıl etkileyeceğini izlemeyi ve değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır.

PFAS'ların kalıcı, biyoakümülatif ve toksik özellikleri, çevre ve sağlık açısından büyük endişe oluşturmaya başlamıştır. PFAS'lar, su kaynaklarından, gıdalardan ve

besin zinciri ile insanlara geçebilir ve potansiyel sağlık riskleri oluşturabilir. Araştırmalar, PFAS'ların bağışıklık, üreme, hormonlar üzerindeki olumsuz etkilerini ve daha bir çok önemli sağlık tehditlerini ortaya koymaktadır. Bu nedenle PFAS'ların kontrol altına alınması, çevresel izleme, azaltım ve temizleme stratejileri üzerine araştırma ve geliştirme yapılması büyük önem taşımaktadır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 9

Kaynaklar

- [1] H. Rekik, H., Pichon, L., M.A. El Khakani, P. Drogui, Per-and polyfluoroalkyl (PFAS) Eternal pollutants: sources, environmental impacts and treatment processes. *Chemosphere*, 142044, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142044>
- [2] A.B. Lindstrom, M.J. Strynar, E.L. Libelo, Polyfluorinated compounds: past, present, and future, *Environmental Science & Technology*, 45(19), 7954-7961, 2011. <https://doi.org/10.1021/es2011622>
- [3] S. Shabanian, S.K. Lahiri, M. Soltani, K. Golovin, Durable water-and oil-repellent textiles without long-or short-chain perfluoroalkylated substances. *Materials Today Chemistry*, 34, 101786, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101786>
- [4] M. Mohseni, S.K. Lahiri, A.V. Nadaraja, U. Sundararaj, K. Golovin, Durable and comfortable superoleophobic fabrics utilizing ultra-short-chain fluorinated surface chemistry. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144726, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144726>
- [5] K.E. Pelch, A. Reade, C.F. Kwiatkowski, F.M. Merced-Nieves, H. Cavalier, K. Schultz, J. Varshavsky, The PFAS-Tox Database: A systematic evidence map of health studies on 29 per-and polyfluoroalkyl substances. *Environment International*, 167, 107408, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107408>
- [6] EPA, PFAS Strategic Roadmap: EPA's Commitments to Action 2021-2024, <https://www.epa.gov/pfas/pfas-strategic-roadmap-epas-commitments-action-2021-2024>, Erişim Tarihi: 10/05/2024.
- [7] V. Gómez, M. Torres, P. Karásková, P. Přibyllová, J. Klánová, K. Pozo, Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFASs) in marine plastic litter from coastal areas of Central Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112818, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112818>
- [8] OECD, Classification of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs), 2021, <https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/aboutpfas/figure1-classification-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances%20-PFASs.pdf>, Erişim Tarihi: 12/01/2024.
- [9] Geosyntec Consultants of North Carolina, Assessment of the Chemical and Spatial Distribution of PFAS in the Cape Fear River, Project Number TR0726, 2018,

- <https://www.chemours.com/en//media/files/corporate/pfas-characterization-quarterly-report-january-2020.pdf>, Erişim Tarihi: 10 Ocak 2024.
- [10] J.P. Antle, M.A. LaRock, Z. Falls, C. Ng, G.E. Atilla-Gokcumen, D.S. Aga, S.M. Simpson, Building Chemical Intuition about Physicochemical Properties of C8-Per-/Polyfluoroalkyl Carboxylic Acids through Computational Means. *ACS ES&T Engineering*, 4(1), 196-208, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00267>
- [11] A. He, Y. Liang, F. Li, Y. Lu, C. Liu, J. Li, G. Jiang, Vital environmental sources for multitudinous fluorinated chemicals: new evidence from industrial byproducts in multienvironmental matrices in a fluorochemical manufactory. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 16789-16800, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04372>
- [12] D. Zhang, J. Li, X. Li, M. Wang, Y. Zhong, G. Chen, Y. Zhang, Phytoremediation of fluoroalkylethers (ether-PFASs): A review on bioaccumulation and ecotoxicological effects. *Science of The Total Environment*, 865, 161260, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161260>
- [13] F.A. Zeidabadi, E.B. Esfahani, M. Mohseni, Effects of Water Matrix on Per-and Poly-fluoroalkyl Substances (PFAS) Treatment: Physical-separation and Degradation Processes—A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100322, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100322>
- [14] M. Ateia, M. Arifuzzaman, S. Pellizzeri, M.F. Attia, N. Tharayil, J.N. Anker, T. Karanfil, Cationic polymer for selective removal of GenX and short-chain PFAS from surface waters and wastewaters at ng/L levels. *Water Research*, 163, 114874, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114874>
- [15] G. Munoz, J. Liu, S.V. Duy, S. Sauvé, Analysis of F-53B, Gen-X, ADONA, and emerging fluoroalkylether substances in environmental and biomonitoring samples: A review. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 23, e00066, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00066>
- [16] R. Dhore, G.S. Murthy, Per/polyfluoroalkyl substances production, applications, and environmental impacts. *Bioresource Technology*, 341, 125808, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125808>
- [17] C.F. Kwiatkowski, D.Q. Andrews, L.S. Birnbaum, T.A. Bruton, J.C. DeWitt, D.R. Knappe, A. Blum, Scientific basis for managing PFAS as a chemical class. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(8), 532-543, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00255>
- [18] M. Dadashi Firouzjaei, E. Zolghadr, S. Ahmadalipour, N. Taghvaei, F. Akbari Afkhami, S. Nejati, M.A. Elliott, Chemistry, abundance, detection and treatment of per-and polyfluoroalkyl substances in water: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 661-679, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01340-6>
- [19] A. Habib, E.N. Landa, K.L. Holbrook, W.S. Walker, W.Y. Lee, Rapid, efficient, and green analytical technique for determination of fluorotelomer alcohol in water by stir bar sorptive extraction. *Chemosphere*, 338, 139439, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139439>
- [20] M.N. Goukeh, T. Abichou, Y. Tang, Measurement of fluorotelomer alcohols based on solid phase microextraction followed by gas chromatography-mass spectrometry and its application in solid waste study. *Chemosphere*, 345, 140460, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140460>
- [21] B. Ameduri, Fluoropolymers: A special class of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) essential for our daily life. *Journal of Fluorine Chemistry*, 267, 110117, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2023.110117>
- [22] K.R. Miner, H. Clifford, T. Taruscio, M. Potocki, G. Solomon, M. Ritari, P.A. Mayewski, Deposition of PFAS 'forever chemicals' on Mt. Everest. *Science of the Total Environment*, 759, 144421, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144421>
- [23] T. Zhou, X. Li, H. Liu, S. Dong, Z. Zhang, Z. Wang, Q. Wang, Occurrence, fate, and remediation for per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in sewage sludge: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*, 133637, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133637>
- [24] A. Sanchez-Vidal, M. Llorca, M. Farré, M. Canals, D. Barceló, P. Puig, A. Calafat, Delivery of unprecedented amounts of perfluoroalkyl substances towards the deep-sea. *Science of The Total Environment*, 526, 41-48, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.080>
- [25] D. Zhang, J. Li, X. Li, M. Wang, Y. Zhong, G. Chen, Y. Zhang, Phytoremediation of fluoroalkylethers (ether-PFASs): A review on bioaccumulation and ecotoxicological effects. *Science of The Total Environment*, 865, 161260, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161260>
- [26] Y. Shen, L. Wang, Y. Ding, S. Liu, Y. Li, Z. Zhou, Y. Liang, Trends in the analysis and exploration of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in environmental matrices: A review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 1-25, 2023. <https://doi.org/10.1080/10408347.2023.2231535>
- [27] A.F. Peritore, E. Gugliandolo, S. Cuzzocrea, R. Crupi, D. Britti, Current Review of Increasing Animal Health Threat of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Harms, Limitations, and Alternatives to Manage Their Toxicity. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14), 11707, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijms241411707>
- [28] F.G. Torres, G.E. De-la-Torre, Per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in consumable species and food products. *Journal of Food Science and Technology*, 60(9), 2319-2336, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05545-7>
- [29] T. Groffen, H. Keirsebelik, H. Dendievel, M. Falcou-Préflo, L. Bervoets, J. Schoelnyck, Are Chinese mitten

- crabs (*Eriocheir sinensis*) suitable as biomonitor or bioindicator of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) pollution?. *Journal of Hazardous Materials*, 464, 133024, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133024>
- [30] C. Vendl, M.D. Taylor, J. Bräunig, L. Ricolfi, R. Ahmed, M. Chin, S. Nakagawa, Profiling research on PFAS in wildlife: Systematic evidence map and bibliometric analysis. *Ecological Solutions and Evidence*, 5(1), e12292, 2024. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12292>
- [31] S. Tartu, S. Bourgeon, J. Aars, M. Andersen, K. Lone, B.M. Jenssen, H. Routti, Diet and metabolic state are the main factors determining concentrations of perfluoroalkyl substances in female polar bears from Svalbard. *Environmental Pollution*, 229, 146-158, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.100>
- [32] K. Lee, J.J. Alava, P. Cottrell, L. Cottrell, R. Grace, I. Zysk, S. Raverty, Emerging Contaminants and New POPs (PFAS and HBCDD) in Endangered Southern Resident and Bigg's (Transient) Killer Whales (*Orcinus orca*): In Utero Maternal Transfer and Pollution Management Implications. *Environmental Science & Technology*, 57(1), 360-374, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04126>
- [33] M. Marín-García, C. Fàbregas, C. Argenté, J. Díaz-Ferrero, C. Gómez-Canela, Accumulation and dietary risks of perfluoroalkyl substances in fish and shellfish: A market-based study in Barcelona. *Environmental Research*, 237, 117009, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117009>
- [34] K.E. Hopkins, M.A. McKinney, A. Saini, R.J. Letcher, N.K. Karouna-Renier, K.J. Fernie, Characterizing the Movement of Per-and Polyfluoroalkyl Substances in an Avian Aquatic-Terrestrial Food Web. *Environmental Science & Technology*, 57(48), 20249-20260, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06944>
- [35] S.E. George, T.R. Baker, B.B. Baker, Nonlethal detection of PFAS bioaccumulation and biomagnification within fishes in an urban-and wastewater-dominant Great Lakes watershed. *Environmental Pollution*, 321, 121123, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121123>
- [36] L. Lesmeister, F.T. Lange, J. Breuer, A. Biegel-Engler, E. Giese, M. Scheurer, Extending the knowledge about PFAS bioaccumulation factors for agricultural plants a review. *Science of The Total Environment*, 766, 142640, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142640>
- [37] W. Nassazzi, T.C. Wu, J. Jass, F.Y. Lai, L. Ahrens, Phytoextraction of per-and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) and the influence of supplements on the performance of short-rotation crops. *Environmental Pollution*, 122038, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122038>
- [38] E. Kavusi, B.S.K. Ansar, S. Ebrahimi, R. Sharma, S.S. Ghoreishi, K. Nobaharan, T. Astatkie, Critical review on phytoremediation of polyfluoroalkyl substances from environmental matrices: Need for global concern. *Environmental Research*, 217, 114844, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114844>
- [39] R. Ghisi, T. Vamerali, S. Manzetti, Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environmental Research*, 326-341, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.023>
- [40] M.C.S. Costello, L.S. Lee, Sources, fate, and plant uptake in agricultural systems of per-and polyfluoroalkyl substances. *Current Pollution Reports*, 1-21, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00168-y>
- [41] Z. Liu, Y. Lu, Y. Shi, P. Wang, K. Jones, A.J. Sweetman, K. Khan, Crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids through multi-media transport from a mega fluorochemical industrial park, China. *Environment International*, 106, 37-47, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.014>
- [42] H. Jin, G. Shan, L. Zhu, H. Sun, Y. Luo, Perfluoroalkyl acids including isomers in tree barks from a Chinese fluorochemical manufacturing park: implication for airborne transportation. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 2016-2024, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06241>
- [43] M. Berthou, V. Gérard, M. Pélingre, A. Bagard, T.L. Batteux, G. Losfeld, Is it raining PFAS in France? An analysis of 52 PFAS at nanogram per liter levels in French rainwaters during autumn season. *Journal of Environmental Quality*, 53(1), 123-132, 2024. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20525>
- [44] O. Adu, X. Ma, V.K. Sharma, Bioavailability, phytotoxicity and plant uptake of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130805, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130805>
- [45] S.E. Fenton, A. Ducatman, A. Boobis, J.C. DeWitt, C. Lau, C. Ng, S.M. Roberts, Per-and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: Current state of knowledge and strategies for informing future research. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(3), 606-630, 2021. <https://doi.org/10.1002/etc.4890>
- [46] A. Podder, A.A. Sadmani, D. Reinhart, N.B. Chang, R. Goel, Per-and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) as a contaminant of emerging concern in surface water: a transboundary review of their occurrences and toxicity effects. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126361, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126361>
- [47] EPA, Our Current Understanding of Human Health and Environmental Risks from PFAS, 2023, <https://www.epa.gov/pfas/our-current-und-erstanding-human-health-and-environmental-risks-pfas> Erişim Tarihi: 18/03/2024.
- [48] F.M. Hekster, R.W. Laane, P. De Voogt, Environmental and toxicity effects of perfluoroalkylated substances. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol 179. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/0-387-21731-2_4
- [49] K. Nahar, N.A. Zulkarnain, R.K. Niven, A review of analytical methods and technologies for monitoring

- per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water. *Water*, 15(20), 3577, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15203577>
- [50] Z. Abunada, M.Y. Alazaiza, M.J. Bashir, An overview of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment: Source, fate, risk and regulations. *Water*, 12(12), 2020. <https://doi.org/10.3390/w12123590>
- [51] CDC, National Health and Nutrition Examination Survey, 2023, <https://www.cdc.gov/nchs/nhanes/index.htm> Erişim Tarihi: 05/11/2023.
- [52] A.M. Calafat, L.Y. Wong, Z. Kuklenyik, J.A. Reidy, L.L. Needham, Polyfluoroalkyl chemicals in the US population: data from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2003-2004 and comparisons with NHANES 1999-2000. *Environmental Health Perspectives*, 115(11), 1596-1602, 2007. <https://doi.org/10.1289/ehp.1059>
- [53] J.M. Graber, C. Alexander, R.J. Laumbach, K. Black, P.O. Strickland, P.G. Georgopoulos, C.P. Weisel, Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) blood levels after contamination of a community water supply and comparison with 2013-2014 NHANES. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29(2), 172-182, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0096-z>
- [54] I. Rosato, T. Bonato, T. Fletcher, E. Batzella, C. Canova, Estimation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) half-lives in human studies: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 117743, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117743>
- [55] K. Abraham, B.H. Monien, Transdermal absorption of ¹³C₄-perfluorooctanoic acid (¹³C₄-PFOA) from a sunscreen in a male volunteer—What could be the contribution of cosmetics to the internal exposure of perfluoroalkyl substances (PFAS)?. *Environment International*, 169, 107549, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107549>
- [56] J. Marchiandi, W. Alghamdi, S. Dagnino, M.P. Green, B.O. Clarke, Exposure to endocrine disrupting chemicals from beverage packaging materials and risk assessment for consumers. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133314, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133314>
- [57] H.P. Susmann, L.A. Schaidler, K.M. Rodgers, R.A. Rudel, Dietary habits related to food packaging and population exposure to PFASs. *Environmental Health Perspectives*, 127(10), 107003, 2019. <https://doi.org/10.1289/EHP40>
- [58] IPEN, Single-Use Food Packaging in 17 Countries Contains PFAS “Forever Chemicals”, 2023, <https://ipen.org/news/single-use-food-packaging-17-countries-contains-pfas-> Erişim Tarihi: 23/05/2024
- [59] R.A. Wicker, *To Dye For: How Toxic Fashion Is Making Us Sick—and How We Can Fight Back*, Penguin Publishing Group, ISBN: 0593422619, 9780593422618, USA, 2023.
- [60] Q. Sun, T. Wang, X. Zhan, S. Hong, L. Lin, P. Tan, J.S. Khim, Legacy and novel perfluoroalkyl substances in raw and cooked squids: Perspective from health risks and nutrient benefits. *Environment International*, 108024, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108024>
- [61] J.T. Thompson, B. Chen, J.A. Bowden, T.G. Townsend, Per-and polyfluoroalkyl substances in toilet paper and the impact on wastewater systems. *Environmental Science & Technology Letters*, 10(3), 234-239, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00094>
- [62] D.K. Essumang, A. Eshun, J.N. Hogarh, J.K. Bentum, J.K. Adjei, J. Negishi, S. Masunaga, Perfluoroalkyl acids (PFAAs) in the Pra and Kakum River basins and associated tap water in Ghana. *Science of the Total Environment*, 579, 729-735, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.035>
- [63] Y. Shiwaku, P. Lee, P. Thepaksorn, B. Zheng, A. Koizumi, K.H. Harada, Spatial and temporal trends in perfluorooctanoic and perfluorohexanoic acid in well, surface, and tap water around a fluoropolymer plant in Osaka, Japan. *Chemosphere*, 164, 603-610, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.006>
- [64] D. Cserbik, M. Casas, C. Flores, A. Paraian, L.S. Haug, I. Rivas, C.M. Villanueva, Concentrations of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in paired tap water and blood samples during pregnancy. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 34(1), 90-96, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41370-023-00581-7>
- [65] J. Li, W. Duan, Z. An, Z. Jiang, L. Li, M. Guo, H. Guo, Legacy and alternative per-and polyfluoroalkyl substances spatiotemporal distribution in China: human exposure, environmental media, and risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 135795, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135795>
- [66] European Environment Agency (EEA), Zero Pollution: Cross-Cutting Stories, PFAS, <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollutioncross-cutting-stories/pfas> Erişim Tarihi: 12/12/2023.
- [67] B. Göckener, T. Weber, H. Rüdell, M. Bücking, M. Kolossa-Gehring, Human biomonitoring of per-and polyfluoroalkyl substances in German blood plasma samples from 1982 to 2019. *Environment International*, 145, 106123, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106123>
- [68] C. Schröter-Kermani, J. Müller, H. Jüriling, A. Conrad, C. Schulte, Retrospective monitoring of perfluorocarboxylates and perfluorosulfonates in human plasma archived by the German Environmental Specimen Bank. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 216(6), 633-640, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.08.004>
- [69] J.M. Conley, C.S. Lambright, N. Evans, M.J. Strynar, J. McCord, B.S. McIntyre, L.E. Gray Jr, Adverse maternal, fetal, and postnatal effects of hexafluoropropylene oxide dimer acid (GenX) from oral gestational exposure in Sprague-Dawley rats. *Environmental Health Perspectives*, 127(3), 037008, 2019. <https://doi.org/10.1289/EHP437>

- [70] J.C. Rae, L. Craig, T.W. Slone, S.R. Frame, L.W. Buxton, G.L. Kennedy, Evaluation of chronic toxicity and carcinogenicity of ammonium 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(heptafluoropropoxy)-propanoate in Sprague-Dawley rats. *Toxicology Reports*, 2, 939-949, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2015.06.001>
- [71] National Toxicology Program (NTP), NTP Technical Report on the Toxicity Studies of Perfluoroalkyl Carboxylates (Perfluorohexanoic Acid, Perfluorooctanoic Acid, Perfluorononanoic Acid, and Perfluorodecanoic Acid) Administered by Gavage to Sprague Dawley (HsdDawley SD) Rats, Toxicity Report 97, 2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK551546/> <https://doi.org/10.22427/NTP-TOX-97>
- [72] B.J. Henry, J.P. Carlin, J.A. Hammerschmidt, R.C. Buck, L.W. Buxton, H. Fiedler, O. Hernandez, A critical review of the application of polymer of low concern and regulatory criteria to fluoropolymers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 14(3), 316-334, 2018. <https://doi.org/10.1002/ieam.4035>
- [73] S.H. Korzeniowski, R.C. Buck, R.M. Newkold, A.E. Kassmi, E. Laganis, Y. Matsuoka, S. Musio, A critical review of the application of polymer of low concern regulatory criteria to fluoropolymers II: fluoroplastics and fluoroelastomers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(2), 326-354, 2023. <https://doi.org/10.1002/ieam.4646>
- [74] G.O. Sebe, E.V. Anyaogu, A.D.A.R.C. Ntomchukwu, S.O. Oghenerhoro, O.E. Jonathan, Health Impacts and Mechanisms of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from Epidemiological to Toxicological. *J. of Biosciences and Medicines*, 11(12), 218-240, 2023. <https://doi.org/10.4236/jbm.2023.1112018>
- [75] M. Nian, K. Luo, F. Luo, R. Aimuzi, X. Huo, Q. Chen, J. Zhang, Association between prenatal exposure to PFAS and fetal sex hormones: are the short-chain PFAS safer?. *Environmental Science & Technology*, 54(13), 8291-8299, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02444>
- [76] K. Lucas, L.G. Gaines, T. Paris-Davila, L.A. Nylander-French, Occupational exposure and serum levels of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review. *American Journal of Industrial Medicine*, 66(5), 379-392, 2023. <https://doi.org/10.1002/ajim.23454>
- [77] J. John, F. Coulon, P.V. Chellam, Detection and treatment strategies of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Fate of PFAS through DPSIR framework analysis. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102463, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102463>
- [78] B. Saawarn, B. Mahanty, S. Hait, S. Hussain, Sources, occurrence, and treatment techniques of per-and polyfluoroalkyl substances in aqueous matrices: A comprehensive review. *Environmental Research*, 214, 114004, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114004>
- [79] N. Rhakho, S. Yadav, M. Jinagi, A. Altaee, M. Saxena, A.H. Jadhav, A.K. Samal, Mitigating PFAS Contaminants in Water: A Comprehensive Survey of Remediation Strategies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 113425, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113425>





Tahıllarda bulunan antosiyaninler ve sağlık üzerine etkileri Anthocyanins in grains and their effects on health

Yavuz Yüksel ^{1,*} 

¹ Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir Türkiye
¹ Balıkesir University, Faculty of Engineering, Food Engineering Department, 10145, Balıkesir, Türkiye

Öz

Antosiyaninler, polifenolik bileşikler olup, flavonoid pigmentlerin en önemli grubudur. Tarımsal ürünlerde yaygın olarak bulunurlar. Antosiyaninler, tüm gelişmiş bitkilerin çiçekleri, meyveleri, yaprakları, gövdeleri ve köklerinde oluşmaktadır. Antosiyaninlerin renkleri gıdanın asitliliğine de bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çoğu antosiyanin asidik şartlarda kırmızı ve düşük asitli şartlarda ise mavi renge dönüşmektedir. Gıdalarda serbest halde bulunmazlar. Bazı organik bileşenler ile bağlı olarak bulunurlar. Antosiyaninlerin iltihap giderici, damar koruyucu, normal damar geçirgenliğini koruyucu, trombosit kümeleşmesini önleyici, tümör gelişimini önleyici, antiülser, diyabet kontrolü ve UV radyasyona karşı koruyucu etkileri gibi birçok faydalı yönünün olduğu bilinmektedir. Yapılan in vivo ve in vitro çalışmalar bu faydaları doğrulayıcı niteliktedir. Araştırma sonuçları incelendiğinde tahıllarda renk yoğunluğu arttıkça antosiyanin oranlarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Tahıllarda çeşit farklılığına göre, siyanidin, pelargonidin, peonidin, delphinidin ve malvidin grubu antosiyaninler farklı oranlarda tespit edilmişlerdir. Bu çalışmada tahıllarda teknolojik uygulamalarda sınırlı kullanım alanı olan fakat insan sağlığı açısından önemli bir yeri olan antosiyaninlerin tahıllarda bulunma durumu ve ayrıca bunların insan sağlığı üzerine etkileri derlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tahıllar, Antosiyaninler, Sağlık

1 Giriş

Antosiyaninler, 1664 yılından beri pH indikatörü olarak bilinmekteyken, isim olarak ilk kez 1835 yılında kullanılmaya başlanmıştır [1]. İlk antosiyanin 1913 yılında mavi çiçekli *Centaurea cyanus* bitkisinde tanımlanmış ve daha sonrasında antosiyanin sayısı günümüzde 600'ü aşmıştır. Antosiyaninleri de içeren flavonoidlerin bitkilerdeki görevleri, mikroorganizmalar için sinyal, patojenlere karşı koruma, biyotik ve abiyotik stresleri iyileştirme, oksinlerin taşınmasında ve bitki verimliliğinde etki, böcek ve diğer hayvan polinatörler için çiçekleri görünür yapmak, angiosperm çiçeklerinde renk çeşitliliğinin oluşturulması olarak sıralanabilir [2]. Antosiyaninlerin farklı fonksiyonlarının keşfi ve insan sağlığı üzerindeki olumlu etkilerinin anlaşılması, antosiyaninler üzerindeki araştırmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur. Antosiyaninler suda çözünür flavonoidlerdir. Meyvelerde,

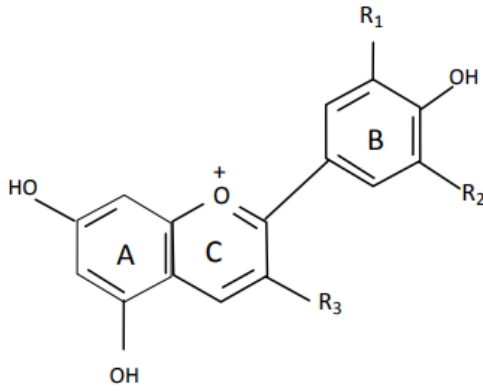
Abstract

Anthocyanins are polyphenolic compounds and are the most important group of flavonoid pigments. It is widely found in agricultural products. Anthocyanins occur in all advanced plants' flowers, fruits, leaves, stems, and roots. The colors of anthocyanins vary depending on the acidity of the food. Most anthocyanins turn red under acidic conditions and blue in low-acid conditions. They are not found free in foods. They are found bound together with some organic components. It is known that anthocyanins have many beneficial aspects such as anti-inflammatory, vascular protection, normal vascular permeability, platelet aggregation, tumor development, antiulcer, diabetes control, and protection against UV radiation. In vivo and in vitro studies confirm these benefits. When the research results were examined, it was observed that anthocyanin rates increased as the color intensity in grains increased. According to the variety differences in cereals, cyanidin, pelargonidin, peonidin, delphinidin, and malvidin group anthocyanins were detected in different amounts. In this study, the presence of anthocyanins in cereals, which have limited use in technological applications but have an important place in human health, and their effects on human health were compiled.

Keywords: Cereals, Anthocyanins, Health

sebzelerde ve tahıllarda kırmızı, mor ve mavi renklerin oluşumundan sorumludurlar. Antosiyaninler, gıdalarda serbest halde bulunmazlar ya glikoz, ksiloz, galaktoz, arabinoz ve fruktoz gibi şekerlerle esterleşmiş ya da şekerlere ilaveten 3. bir bileşen olarak p-kumarik asit, ferulik asit, kafeik asit, malonik asit, vanilik asit ya da asetik asit moleküllerinden biri veya birden fazlasıyla birleşmiş olarak bulunurlar [3]. Antosiyanin glikozil ünitelerine üçüncü bir komponentin ester bağları ile bağlanması olayına açılma denir. Açılma, genellikle aromatik veya alifatik asitlerle veya her ikisinin kombinasyonu ile meydana gelmektedir [4]. Şekil 1'de bir antosiyanin molekülünün temel yapısı gösterilmiştir. Temel yapıyı oluşturan üç halka A, B ve C harfleri ile işaretlenmiştir. Bu temel yapıya bağlı olan R1, R2 ve R3 ise antosiyanin çeşitlerinin oluşumunu sağlayan değişken grupları göstermektedir [5].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yavuzyuksele@balikesir.edu.tr (Y. Yüksel)
Geliş / Received: 01.08.2024 Kabul / Accepted: 22.11.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1524316



Şekil 1. Bir antosiyanin molekülünün temel yapısı [5].

2 Tahıllarda bulunan antosiyaninler

Tahıllar, insan beslenmesi için günlük temel gıdalardır. Küresel üretimde önemli paya sahip başlıca tahıllar mısır (*Zea mays*), pirinç (*Oryza sativa*), buğday (*Triticum spp.*), arpa (*Hordeum vulgare*) ve sorgumdur (*Sorghum bicolor*). Bunun yanı sıra darı, yulaf (*Avena sativa*), çavdar (*Secale cereale*) ve bunun gibi diğer tahıl çeşitleri de yöresel olarak öneme sahiptirler. Doğal yapısında farklı pigmentler içeren siyah, mor, mavi, pembe, kırmızı ve kahverengi tahıllar bulunmaktadır [6]. Bu renkli tahıllar antosiyaninler açısından zengindirler. Potansiyel sağlık etkilerini artırmaya yönelik üretilen yeni gıda ürünlerinin formülasyonlarında kullanılabilmektedirler [7].

Renkli (siyah, mor, mavi, pembe, kırmızı ve kahverengi) tahıl taneleri, dikkat çekici besin değerleri nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Şekil 2’de farklı renkteki bazı tahıl çeşitleri verilmiştir [5; 8-13]. Tahılların renklerinden ve sağlık yararlarından sorumlu olan önemli bir pigment türü antosiyaninlerdir. Çeşitli tahıllar arasında antosiyanin bileşiminde büyük bir çeşitlilik vardır. Çok gelişmiş antosiyanin içeriğine sahip özel tahıl genotipleri (örn. antosiyaninler açısından zengin pirinç tanelerinin endospermi) genetik yollarla geliştirilmiştir. Fonksiyonel gıda üretimi için potansiyel bileşenler olarak renkli tahıllar, sağlık yararları nedeniyle kapsamlı araştırmalara tabi tutulmuşlardır. İddia edilen sağlık yararları arasında antioksidasyon, anti-kanser, glisemik ve vücut ağırlığı düzenlemesi, nöro-koruma, retinal koruma, hipolipidemi, hepato-koruma ve yaşlanmayı geciktirme yer almaktadır. Bu pozitif sağlık etkileri, tahıl antosiyaninlerinin insan beslenmesinde bir potansiyel olduğunu göstermektedir [13].

Tahıllarda tane rengi esas olarak antosiyanin pigmentleri tarafından belirlenir. Farklı türlerin tahıllarında antosiyanin içeriği ve bileşiminde büyük bir genetik çeşitlilik gözlemlenmiştir. Çavdarda, altı gendeki resesif mutasyonlar, bitkinin tüm kısımlarında antosiyanin eksikliğine neden olmuştur. Ayrıca, aleuron ve perikarptaki antosiyanin sentezinin baskın genleri de tanenin rengini etkilemektedir [14].



Şekil 2. Farklı renk pigmentlerine sahip tahıl taneleri (A: Kabuksuz mavi arpa B: Kabuksuz mor arpa C: Kabuklu mor arpa D: Kabuklu siyah arpa E: Mavi mısır F: Pembe mısır G: Siyah mısır H: Bronz (kahverengi) mısır I: Amber buğday J: Mor Buğday K: Mavi buğday L: Siyah buğday)

Antosiyaninler asitleştirilmiş alkol sulu çözeltileri ile izole edildikten sonra kromatografik tekniklerle birbirinden ayrılmaktadırlar. Antosiyaninlerin yapısı, yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC), kütle spektrometrisi (MS), nükleer manyetik rezonans (NMR), hidroliz teknikleri ve ultraviyole görünür spektroskopisi (UVV) dahil olmak üzere bir dizi analitik yöntemle belirlenmektedir [6].

Son birkaç yılda, farklı renkteki tahılların yeni genotiplerinden antosiyaninlerin karakterizasyonu ile ilgili birçok makale yayınlanmıştır [14-18]. Aynı zamanda, son yıllarda birçok yeni renkli tahıl genotipi geliştirilmiş ve bunlar için analitik teknikler çalışılmıştır [6,19-23]. Örneğin, yakın zamanda transformasyon yoluyla renkli endospermi olan yeni bir pirinç genotipi geliştirilmiştir [24]. Ayrıca, renkli tahıllardan elde edilen antosiyaninlerin potansiyel sağlık etkileri in vitro ve in vivo olarak da incelenmiştir [25-29]. Renkli tahılların meyve sineklerinin ve nematodların ömrünü uzattığına yönelik araştırma sonuçları bulunmaktadır [29, 30]. Araştırmalar, polifenoller (antosiyaninler dahil) bakımından zengin bitkisel tarım ürünlerinin tüketiminin, kronik hastalıkların ve tıbbi bozuklukların ortaya çıkması ile negatif ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu konuda yapılan epidemiyolojik çalışmaların sonuçları bu tezi doğrulayıcı niteliktedir. Antosiyaninlerin iddia edilen sağlık etkileri, renkli tahılların sağlıklı gıda olarak tüketimlerini teşvik etmektedir [13]. Tahıllarda bulunan antosiyanin çeşitliliğinin coğrafi konum ve botanik özellikler açısından ne derecede değiştiğine yönelik araştırmaların daha da artırılması literatüre katkı sağlayacaktır. Bu sayede insan sağlığı açısından daha faydalı

ve fonksiyonel nitelikteki tahıllara olan ilginin giderek artacağı düşünülmektedir.

3 Çeşitli tahıllarda bulunan antosiyaninlerin bileşimleri

Tahıllarda ticari öneme sahip olan mısır, pirinç, buğday, arpa, çavdar ve sorgum çeşitlerine ait dünya üzerinde birçok farklı tür bulunmaktadır. Botanik ve ekolojik faktörler bu farklılıkların nedenlerindedir. Aşağıda farklı renklere sahip tahıl türlerinin antosiyanin içerikleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

3.1 Mısır

Mısır danesinin renginin oluşmasında karotenoidler ve antosiyaninler başlıca pigment gruplarıdır. Sarı renk oluşturanlar karotenoidler, kırmızıdan maviye kadar değişen renkleri oluşturanlar ise antosiyaninlerdir. Antosiyaninler, çekirdekte siyanidin, pelargonidin ve peonidin olarak bulunan flavonoid bileşiklerdir [31].

Mısır tanelerinin renginde (siyah, mavi, pembe, kırmızı, kahverengi) büyük bir genetik çeşitlilik vardır (Şekil 2-E, F, G, H). Mor mısır çekirdeğinde pigmentler çoğunlukla kalın olan perikarpta yoğunlaşmaktadır. İnce ve renksiz perikarpı olan mavi mısırdaki ise pigmentler alöron katmanlarında yoğunlaşmaktadır [5]. Antosiyaninler açısından zengin endospermilere sahip bir mısır genotipi henüz geliştirilememiştir. Mısır koçanı antosiyaninler açısından da zengin olabilir [32]. Collison vd. [33] mor mısır tanesinin mavi, kırmızı/mavi ve kırmızı mısırlara göre daha yüksek antosiyanin içeriğine sahip olduğunu belirlemiştir. Harakotr vd. [34] 12 waxy mısır genotipinde farklı antosiyanin bileşiklerinin varlığını [siyanidin 3-glukozit, pelargonidin 3-glukozit, peonidin 3-glukozit, siyanidin 3-(6"-malonilglukozit), pelargonidin 3-(6"- malonilglukozit), peonidin 3-(6"- malonilglukozit), siyanidin 3-(3",6"-dimalonilglukozit), siyanidin 3-(6"- süksinilglukozit), siyanidin 3-(3",6"-malonilsüksinilglukozit) ve peonidin 3-(6"-süksinilglukozit)] tespit etmişlerdir. Diğer çalışmalar siyanidin 3-glikozit, peonidin 3-glikozit ve pelargonidin 3-glikozitin başlıca antosiyaninler olduğunu göstermiştir. Fakat antosiyanin bileşimi (örneğin, açillenmiş antosiyaninlerin miktarı) farklı çalışmalar arasında büyük farklılıklar göstermiştir [32, 35, 36]. Mor mısırdaki bulunan toplam antosiyanin içeriği oldukça yüksektir. Tam mor mısır için, mg siyanidin-3-glukozit/100 g cinsinden konsantrasyonunun kuru maddede 1779 mg/100 g olduğu belirlenmiştir. Bu durum antosiyaninler açısından zengin ekstraktların elde edilmesinde iyi bir kaynaktır. Bazı pigmentli tahılların antosiyanin bileşimi ne nitelik ne de niceliksel açıdan hâlâ tam olarak belirlenememiştir [37]. Bazı mısırların toplam antosiyanin içeriklerine ait sonuçlar Tablo 1' de verilmiştir.

3.2 Pirinç

Beslenme ve sağlık özellikleri göz önüne alındığında, antosiyaninle zenginleştirilmiş pirinç veya pigmentli pirinç çeşitleri dünya çapında yetersiz beslenmeyi azaltmak için olası bir alternatiftir. Pirinçte antosiyanin biyosentezi ve depolanması, çeşitli yapısal ve düzenleyici genlerin dahil olduğu karmaşık süreçlerdir [38]. Mısır gibi, pirinç

tanelerinin renginde de büyük bir genetik çeşitlilik bulunmaktadır [24]. Birçok farklı renkli pirinç antosiyanin tipleri ve içerikleri yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [33, 39-49]. Örneğin, bir Japon siyah pirinçindeki tipik antosiyaninler;

- siyanidin 3,5-diglukozit (13 CGEµg/g),
 - siyanidin 3-glukozit (1239 µg/g),
 - siyanidin 3-(6"-p-kumaril) glukozit (4 CGE µg/g),
 - pelargonidin 3-glukozit (6 CGEµg/g),
 - peonidin 3-glukozit (131 CGEµg/g),
 - peonidin 3-(6"-p-kumaril)glukozit (4 CGEµg/g),
 - siyanidin 3-arabidozit (3 CGEµg/g) [33] .
- (CGE= Siyanidin 3-O-glukozit equivalent)

Goufo vd. [50] farklı pigmentli pirinç türlerinde antosiyanin ve proantosiyanin konsantrasyonu incelemiştir. Mor pirinç (2874 CGE/100 g) diğer renkli (esmer, kırmızı ve kahverengi) pirinç çeşitlerine göre daha fazla toplam antosiyanin içerdiğini, ayrıca kırmızı pirinç (716.6 CAE/100g) ise diğer renkli pirinç çeşitlerine göre daha fazla proantosiyanidin içerdiğini gözlemlemiştir (CAE= catechin acid equivalent). Pirinç karyopsisinde yaklaşık on sekiz tür antosiyanin bulunmaktadır; bunların arasında siyanidin-3-glikozit (C3G) ve peonidin-3-glikozit (P3G) en çok olanlardır [38], Bazı pirinçlerin toplam antosiyanin içeriklerine ait sonuçlar Tablo 1' de verilmiştir.

3.3 Buğday

Genellikle buğday tohumları renkli formda bulunmaz. Renkli buğday ya farklı yerel türlerden ya da geniş bir melezleştirme süreci yoluyla ortaya çıkmıştır. Renkli buğdaylar, buğday katmanlarındaki antosiyaninlerin türüne ve konumuna bağlı olarak mor, mavi ve siyah olmak üzere üç farklı biçimde oldukları bilinmektedir [51, 52]. Renkli buğday taneleri, karbonhidratlar, yağlar ve proteinler gibi makro besinlerin yanı sıra antosiyaninler, vitaminler, mineraller ve karotenoidler gibi mikro besinler açısından zengin bir kaynaktırlar [52]. Günümüzde yaygın olarak yetiştirilen buğday çeşitlerinin rengi sarıdır. Ancak antosiyaninler ve diğer fitokimyasallar açısından zengin olan renkli buğdaylar, sağlık açısından sağladığı faydalar nedeniyle dünya çapında popüler hale gelmektedir (Şekil 2- I, J, K, L). Mor buğday 19. yüzyılda ortaya çıkarken [53], mavi buğday ise 20. yüzyılın ilk yarısında *Triticum aestivum*'un, *Triticum monococcum* L. spp. *aegilopoides*, *Thinopyrum ponticum* ve *Th. bessarabicum* gibi farklı yabancı buğday türleri ile melezlenmesiyle geliştirilmiştir [54, 55]. Cazip beslenme profilleri nedeniyle yabancı buğdayların yeni unlu mamullerin formülasyonunda kullanılmasına olan ilgi artmaktadır. Gelişmiş bir antosiyanin içeriğine sahip yabancı buğday genotiplerinin, potansiyel sağlıklı gıda uygulamaları için geliştirilmesi gerekmektedir [13, 56]. Buğdaylarda antosiyaninler endoplazmik retikulumda oluşturulmakta ve vakuollerde depolanmaktadır [57]. Antosiyanin içeren çeşitli renkli buğday türleri [*T. aestivum* (ekmeklik buğday), *T. durum* (durum buğdayı), *T. monococcum* (*einkorn*) ve diğer yabancı buğday türleri] araştırılmıştır.

Tablo 1. Çeşitli renkli tahıllarda antosiyanin bileşimleri

Tahıl Türü	Toplam antosiyanin içerikleri ve antosiyanin tipleri
Mısır	3–696 mg CGE/kg. db [36] 0–1439 µg CGE/g. db [34] 0–1063 µg CGE/g. db [77] Kırmızı örnekler için 9–127. mor örnekler için 891–3312. mavi örnekler için 0–540. kırmızı/mavi örnekler için 46–368 µg CGE/g. db [33] 4.3–117 (toplam antosiyaninler yöntemi); 3.1–100 (pH farkı); 3.1–98.1 (bozulmamış antosiyaninlerin HPLC'si); 1.1–56.1 (HCl ile hidrolize edilmiş antosiyaninlerin HPLC'si) µg CGE/g. db [32] 0.04–0.88 g CGE/kg çekirdek dokusu (pH farkı) [78] 23–252 mg CGE/kg (renk özelliklerinde farklılık gösteren 5 grubun ortalama değerleri) [5]
Pirinç	Siyah pirinç için 3.5 mg CGE/g. kırmızı pirinç için 4.3 CGE µg/g. kahverengi pirinç için 0 CGE µg/g [79] 1.4 CGE mg/g [80] Tam tahıl için 0.87 mg CGE/g. embriyo için 0.34. endosperm için 0 ve kepek için 6.3 [43] 417 mg CGE/g [41] Parlatılmış ve işlenmiş genotip için 1 mg/g'a kadar tahıl. db [24]
Buğday	Durum buğdayı; mor (8.12–50.22 µg/g), kırmızı (1.20–24.57 µg/g) [52] Mor buğday; Siyanidin 3-glukozit (2.64. 10.3. 12.02. 52.8. 103 mg/kg). Siyanidin-3-rutinozit (5.3. 32.53. 0.60 mg/kg). Siyanidin-3-arabinozit (25.1 mg/kg). Siyanidin -3-(6"-malonilglukozit (31.08 mg/kg). Siyanidin-3-(3".6"-dimalonilglukozit) (8.15 mg/kg). Siyanidin-3-galaktozit (0.98. 72.0 mg/kg). Siyanidin-3-süksinil-glukozit (1.2 mg/kg). Delfinidin-3-arabinozit (16.7 mg/kg). Delfinidin-3-galaktozit (38.3. 0.40 mg/kg). Delfinidin-3- glukozit (0.08 mg/kg). Malvidin-3- glukozit (0.48. 51.6. 1.32 mg/kg). Pelargonidin-3-galaktozit (26.1 mg/kg). Pelargonidin-3-arabinozit (9.3 mg/kg). Pelargonidin-3-glukozit (28.8. 2.58. 1.88 mg/kg) Peonidin-3-arabinozit (9.3 mg/kg). Peonidin-3- glukozit (4.61 mg/kg). Peonidin-3- galaktozit (0.58 mg/kg). Peonidin-3.5- rutinozit (9.36 mg/kg). Peonidin-malonil-glukozit (0.6 mg/kg). Petunidin-3- glukozit (40.4 mg/kg) [49. 51. 42. 81-87] Mavi buğday; toplam antosiyanin (82.75–174.27 µg/g). Siyanidin 3-glukozit (3.07. 10.54. 10.76. 4.5 mg/kg). Siyanidin-3-rutinozit (8.42. 12.78 mg/kg). Delfinidin-3- galaktozit (4.95 mg/kg). Delfinidin-3- glukozit (22.23. 29.03. 0.40 mg/kg). Delfinidin-3-rutinozit (29.65. 43.87. 33.44 mg/kg). Malvidin-3- glukozit (12.04. 5.5 mg/kg). Malvidin-3-rutinozit (2.0 mg/kg) Pelargonidin-3-glukozit (0.39 mg/kg). Peonidin-3- arabinozit (2.22 mg/ kg). Peonidin-3- glukozit (0.88 mg/kg). Peonidin-3- galaktozit (1.94 mg/kg). Peonidin-3-rutinozit (1.2. 0.76 mg/kg). Peonidin-3.5- diğluzozit (0.31 mg/kg). Petunidin-3- glukozit (3.18 mg/kg) Petunidin-3-rutinozit (4.5 mg/kg) [49. 51. 52. 81-87] Siyah buğday; Siyanidin 3-glukozit (20.5 mg/kg). Siyanidin-3-rutinozit (11.14 mg/kg). Delfinidin-3-galaktozit (29.14 mg/kg). Delfinidin-3-glukozit (25.64 mg/kg). Delfinidin-3-rutinozit (0.66 mg/kg). Malvidin-3-glukozit (2.18 mg/kg). Pelargonidin-3-glukozit (2.13 mg/kg). Peonidin-3-glukozit (1.40 mg/kg). Peonidin-3-rutinozit (0.97 mg/kg). Peonidin-3.5- diğluzozit (0.23 mg/kg). Petunidin-3-glukozit (2.29 mg/kg) [49. 51. 52. 81-87] Kırmızı buğday; Siyanidin 3-glukozit (4.02 mg/kg). Malvidin-3-glukozit (0.22 mg/kg). Peonidin-3- galaktozit (0.33 mg/kg) [49. 51. 52. 81. 82. 84. 87]
Arpa	17 farklı renkli arpa için ortalama antosiyanin miktarları (µg/g); Malvidin-3- glukozit 19.99 µg/g; Delfinidin-3- glukozit 4.90 µg/g; Peonidin-3- glukozit 0.94 µg/g; Delfinidin-3-rutinozit 0.54 µg/g; Siyanidin 3-glukozit 0.52 µg/g [21] Renkleri farklı 7 grubun ortalama değerleri 60–350 µg/g [8] Macar çeşitleri toplam antosiyanin miktarları; 47–84 mg/kg [88] Toplam antosiyanin içeriği yüksekten düşüğe sırasıyla; mor arpa 105.21 µg/g; mavi arpa 27.42 µg/g; siyah arpa 8.49 µg/g; sarı arpa 4.41 µg/g. Arpa çeşitlerinde yüksek oranda bulunan temel antosiyanin türleri siyanidin. siyanidin-3-glukozit. delfinidin. pelargonidin-3-glukozit. petunidin ve petunidin-3-glukozit olarak tespit edilmiştir [89].
Çavdar	Tam tahıl çavdar unundaki toplam antosiyanin miktarı 3.6 mg/kg olduğu ve tespit edilen antosiyanin çeşitlerinin ise delfinidin-3- glukozit (0.31 mg/kg). delfinidin-3-rutinozit (2.9 mg/kg). siyanidin-3-rutinozit (0.29 mg/kg) ve peonidin-3-rutinozit (0.12 mg/kg) olduğu belirlenmiştir. Çavdar kepeğinde ise toplam antosiyanin miktarı 29.3 mg/kg olarak bulunmuş ve bu antosiyaninlerden delfinidin-3- glukozit 3.1 mg/kg. delfinidin-3-rutinozit 22.8 mg/kg. siyanidin-3-rutinozit 2.3 mg/kg ve peonidin-3-rutinozit 1.1 mg/kg olarak tespit edilmiştir [65].
Sorgum	Kırmızı sorgum çeşitleri 3-deoksiantosiyanin içeriği 0-680 µg/g [90] Siyah sorgum kepeği toplam antosiyanin içeriklerinin 4.0-9.8 mg/g arasında olduğu belirlenmiş ve bu sonuçlara göre diğer tahıl çeşitlerinin kepeklerinden daha fazla antosiyanin içerdikleri tespit edilmiştir [91]. Kahverengi ve kırmızı çeşitlerde toplam 3-deoksiantosiyanidin miktarı 1.6-2.8 mg/g arasındadır [91].

Toplam antosiyanin içerikleri durum mor buğdaylarda 8.12–50.22 µg/g, durum kırmızı buğdaylarda 1.20–24.57 µg/g ve mavi ekmeçlik buğdaylarda ise 82.75–174.27 µg/g arasında tespit edilmiştir [29, 52, 58-61]. Araştırmalar sonucunda buğdaylarda tespit edilen antosiyaninlerin miktarları Tablo 1’de verilmiştir.

3.4 Arpa

Arpa tanelerinin renk çeşitliliği (örneğin siyah, mavi ve mor) ve antosiyanin içeriğindeki genetik değişkenlik araştırılmıştır. Renk özellikleri bakımından farklılık gösteren yedi arpa grubunun (toplam 127 genotip) tanelerindeki ortalama antosiyanin içerikleri 60 ila 350 µg/g arasında değişmektedir [8]. Diğer tahıllarda olduğu gibi, antosiyaninlerin çoğu tanelerin kepeğinde yoğunlaşmaktadır. Örneğin, bir arpa genotipinin kepeğindeki antosiyanin içeriği 1.66 g/kg'a kadar çıkmıştır [62]. Antosiyaninler esas olarak arpa tanesinin perikarp veya alöron katmanlarında bulunmakta ve bu da tane renginde mor veya mavi tonların oluşmasına neden olmaktadır. Genel olarak arpa tanesinin antosiyanin içeriği renginin koyuluğu ile orantılı olup, arpa çeşitleri arasında en yüksek flavonoid içeriğinin mavi ve mor arpa tanesinde olduğu belirlenmiştir [21, 63]. Abdel-Aal vd. [49] ile Mazza ve Gao [64] mor arpada en yaygın antosiyaninin siyanidin 3-glukozit olduğunu, bunu peonidin 3-glukozit ve pelargonidin 3-glukozitin takip ettiğini bildirmiştir. Arpada tespit edilen toplam antosiyanin miktarları Tablo 1’de verilmiştir.

3.5 Çavdar

Çavdar diyet lifinin yanı sıra (*Secale gravae*) taneleri fenolik asitler, lignanlar ve alkilresorsinoller gibi çeşitli fitokimyasallar açısından da zengin bir kaynaktır [65]. Dedio vd. [66] yaptıkları çalışmada, perikarpta siyanidin 3-glukozit, peonidin 3-glukozit ve açılmiş formlar, koleoptilde siyanidin 3-rutinosid ve çavdarın ilk yapraklarında ise siyanidin 3-glukozit tespit edilmiştir. Çavdarda tespit edilen antosiyaninler ve miktarları Tablo 1’de gösterilmiştir.

3.6 Sorgum

Sorgum taneleri renkleri çok çeşitlidir [67]. Dünyada insanlar ve hayvanlar tarafından en çok tüketilen tahıl ürünlerinden biri olan *Sorghum bicolor* (L.) Moench, çeşitli bitki kaynaklı metabolitler içermektedir. Özellikle sorgum taneleri tanenler, antosiyaninler ve flavonoller gibi çeşitli fenolik bileşikler içerir ve bu sayede tohum yüzeyinin veya iç dokusunun renklenmesine neden olur [68-71].

Sorgumda çeşitli türde antosiyaninler bulunmaktadır. 3-deoksiantosiyanidinler ve bunların türevleri en fazla olanlardır. Sorgumun kepek kısmı diğer kısımlarından 3-4 kat daha fazla antosiyanin içermektedir [72]. Bu nedenle, kabuk ayırma işlemleri ile birlikte büyük oranda perikarp ve testa bölgesinden fenolik bileşik kaybı olmaktadır [73, 74]. Sorgumda bulunan 3-deoksiantosiyanidinler metoksilenmiş formlardır. Buna ilaveten sorgumun yapısında, düşük miktarlarda metoksilenmiş 3-deoksiantosiyanidinler (5-metoksi-luteolinidin, 7-metoksi-luteolinidin ve 7-metoksi-apigenininidin), metoksilenmiş 3-

deoksiantosiyaninler (5-metoksi-luteolinidin 5-glukozit, 5-metoksi-luteolinidin 7-glukozit, 7-metoksi-luteolinidin 5-glikozit ve 7-metoksi-apigenininidin 5-glikozit) ve diğer metoksilenmemiş 3-deoksiantosiyaninler (apigenininidin 5-glikozit ve luteolinidin 5-glikozit) bulunmaktadır [18, 23, 75, 76]. Farklı renkte sorgum tanelerinde tespit edilen antosiyanin içerikleri Tablo 1’de verilmiştir.

4 Tahıl antosiyaninlerinin sağlık üzerine etkileri

Antosiyaninler birçok bitkisel üründe (meyve, sebze, tahıl, çiçek vb.) mavi, mor ve kırmızı gibi birçok rengin oluşumunda rol oynamaktadırlar. Ticari olarak önemli olan tahıl çeşitleri, birçok renk pigmentleri içermektedirler [92]. Bu renkler genellikle çekirdeklerde birincil doğal pigmentlerden biri olarak bulunan antosiyaninlerden kaynaklanır. Buğday, mısır, sorgum, arpa, pirinç ve darı çekirdeğin dış katmanlarında önemli miktarda antosiyanin bulunan çeşitlerdir. Antosiyanin açısından zengin renkli tahıllar, tam tahıllı fonksiyonel gıdaların geliştirilmesinde değerlendirilmektedir [93]. Antosiyaninler polifenolik bileşiklerdir. Renk oluşumundaki etkilerine ilaveten insan sağlığı üzerinde de faydalarının olduğu bilinmektedir [94].

Tahıllarda bulunan antosiyaninlerin sağlık üzerine etkileri ile ilgili son yıllarda (in vivo ve in vitro) birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, tahıl antosiyaninlerinin antioksidan aktivite, retinanın korunması, kolesterolün önlenmesi, glisemik indeksin düzenlenmesi, nöronların korunması, antihipertansiyon etkisi, sitoproteksiyon, antikanser, vücut yağ oranı düzenlenmesi, bağışıklık sisteminin geliştirilmesi ve yaşlanmayı geciktirme üzerine etkileri incelenmiştir [13, 95-97].

4.1 Buğday

16 ülkede 60'tan fazla enstitünün yaptığı araştırmalarda, renkli buğdayların sağlık üzerindeki olumlu etkilerinden bahsedilmiştir. Mavi, kırmızı mor ve siyah buğdaylar üzerinde çalışmalar yapılarak araştırma sonuçları yorumlanmıştır. Bu buğdaylar kullanılarak Hindistan, Güney Kore, Çin, Etiyopya, Avusturya, Rusya, Çek Cumhuriyeti, Almanya, Kanada, Hong Kong ve İtalya'daki farklı kurumlar in vivo ve in vitro çalışmalar yapmışlardır. Ayrıca, 2018 ve 2020 yıllarında Çin ve Kanada'da insanlar üzerinde antosiyanin açısından zengin buğday türlerinin fonksiyonel gıda olarak kullanıldığını gösteren iki ayrı çalışma yapılmıştır [58]. Sharma vd. [96] renkli buğdaylardaki antosiyaninlerin pişirme sonucu oluşan amino asit kayıplarını önlemede etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Antosiyaninlerin gıda işleme ve sindirim sırasında bu bileşenlerle olan etkileşimleri sağlık üzerinde olumlu etkiler gösterebileceği bildirilmiştir [98, 99]. Antosiyaninlerin insan sindirim sisteminde bulunan probiyotik metabolizmalar üzerindeki etkisini inceleyen bir in vitro çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak, malvidin 3-glukozidinin ve metabolitlerinin *Lactobacillus-Enterococcus spp.* ve *Bifidobacterium spp.*'nin büyümesini büyük ölçüde artırdığı ve böylece bağırsak bakteri popülasyonunu olumlu yönde düzenlediği gözlemlenmiştir. [100].

Prokop vd. [101] çalışmalarında, mor buğdaydaki antosiyaninlerin Alzheimer hastalığının neden olduğu hafızadaki eksiklikleri önlediğini ve mor buğdayın nörodejeneratif bozuklukların erken tedavisinde umut verici bir fonksiyonel gıda kaynağı olabileceğini belirtmişlerdir. Benzer bir çalışmada, mor buğdayın etkileri ratlar, tavuklar ve balıklarda incelenmiştir. Ratlar ve tavukların karaciğerlerinde bulunan antioksidan ve enzim seviyelerinin olumlu yönde etkilendiği kanıtlanmıştır. Fakat balıklarda aynı etki gözlenmemiştir. Bunun nedeninin ise, balıkların mor buğdayı gerektiği gibi metabolize edememesinden kaynakladığı şeklinde yorumlanmıştır [102]. İnsanlarda yapılan çalışmalar siyah renkli buğdayın, kan şekeri ve insülin düzeylerinde herhangi bir fark olmadan tip 2 diyabetli bireyleri olumlu yönde etkilediğini göstermiştir [103]. Gamel vd. [104] sağlıklı bireyler üzerinde yaptıkları bir araştırmada, kepekli zenginleştirilmiş mor buğdaydan üretilen bar ve krakerlerin sindirim metabolizması üzerine pozitif etkisini gözlemlemiştir.

4.2 Mısır ve sorgum

Petroni vd. [105] mısır antosiyaninlerinin sağlık üzerindeki etkilerini literatürlerden 2013 yılına kadar derlemiştir. Yapılan in vivo çalışmalar, diyabet, obezite, kanser ve kalp-damar hastalıklarını önlemede olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Siyah sorgum ve mavi mısırdan elde edilen antosiyanin açısından zengin özütlerin nişasta sindirimi üzerindeki etkisi in vitro çalışma ile incelenmiştir. Her iki özütün de nişasta sindirimini ve glisemik indeks değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Siyah sorgum glisemik indeks değerini 90'dan 67 değerine düşürmüştür. Mavi mısır özütü ise sindirilebilir nişasta değerlerini düşürmüştür. Sonuçlar, siyah sorgum özütünün mavi mısır özütüne nazaran glisemik indeks düşürmede ve nişasta sindirilebilirliğini azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir [35, 99]. Renkli sorgum ve mısır özütlerinin çeşitli kanser hücreleri üzerindeki antikanser etkileri in vitro olarak incelenmiştir. Siyah sorgum özütlerinin diğer sorgum çeşitlerine nazaran tümör büyümesine karşı daha etkili olduğu belirlenmiştir [75, 106, 107]. Urias-Lugo vd. [107] mavi mısır özütünün meme, kolon, karaciğer ve prostat kanser hücreleri üzerindeki anti-proliferatif etkilerini incelemiştir. Sonuçlar HCl ile asitlendirilmiş etanol çözeltilisi kullanılarak hazırlanan özütlerin yüksek anti-proliferatif etki gösterdiğini ortaya koymuştur.

4.3 Pirinç

İn vivo yapılan çalışmalar, siyah pirinç antosiyaninleri farelerde yaşlanma karşıtı etki, sineklerde ise nöron dejenerasyonunu önleme etkisi göstermiştir [41]. Renkli tahıllardan yapılan gıda ürünleri yalnızca antosiyaninler değil, aynı zamanda diyet lifi, nişasta, protein ve diğer polifenoller gibi bir dizi başka bileşen de içermektedir [7]. Yapılan bir çalışmada, mor pirinç özütü ve içeriğindeki siyanidin 3-glukozit, hücre ölümüne karşı nöroprotektif aktivite göstermiştir [108]. Diğer bir çalışmada, siyah pirinç özleri farelerde hiperlipidemik koşulları iyileştirmiştir [109, 110]. Siyah pirinç/mor buğday özleri ile yapılan çalışma sonuçları, hayvan modellerinde yaşlanma karşıtı ve yaşam

süresini uzatıcı etkiler göstermiştir [29, 30, 111]. Siyah pirinçten saflaştırılan siyanidin 3-glukozidinin farelerde fibroza karşı koruma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, bu antosiyaninin farelerde hepatotoksisiteyi ve hepatik fibrozu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir [112].

4.4 Arpa

Siyah arpa özütü ile yapılan in vivo çalışmada, özütün farelerde toplam kolesterol, düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterol (LDL), ateroskleroz indeksini büyük ölçüde azalttığı, yüksek yoğunluklu lipoprotein kolesterolü (HDL) ise artırdığı gözlemlenmiştir. Özütün kolesterol düşürücü etkisi yapılan in vitro çalışmalar ile de doğrulanmıştır [113].

5 Sonuçlar

Son yıllarda antosiyanin bileşimi için farklı renkli tahılların birçok genotipi çalışılmıştır. Antosiyaninlerin bileşimi ve yapısı yetiştirme şartlarından ve botanik çeşitlilikten etkilenebilmektedir. Sonuçlar, tahıllarda toplam antosiyanin bakımından zengin tahıl çeşitlerinin mor mısır, mor pirinç, mavi ekmeklik buğday, mor arpa ve siyah sorgum olduğunu göstermiştir. Antosiyanin bileşik çeşitliliği bakımından tahıllarda yapılan araştırmalar incelendiğinde bazı bileşiklerin diğerlerine göre daha yüksek oranlarda oldukları gözlemlenmiştir. Bunlar içerisinde göze çarpan bileşiklerin siyanidin 3-glikozit, peonidin 3-glikozit, pelargonidin 3-glikozit ve 3-deoksiantosiyanidin olduğu tespit edilmiştir. Antosiyaninlerin belirlenmesine yönelik yapılan araştırmalarda farklı yöntemlerin kullanılmış olması ve genotip çeşitliliği nedeniyle literatürlerden alınan değerlerin karşılaştırılmasında zorluklar yaşanmıştır. In vitro ve in vivo çalışmalar, renkli tahıllarda belirlenen antosiyaninlerin birçok sağlık sorunu üzerine olumlu etkilerinin olduğunu ispatlar niteliktedir. Gözlemlenen en belirgin etkiler, antikanser, glisemik indeks düzenleme, nöronların korunumu, retinal koruma, karaciğer hasarı önleme, vücut ağırlığı kontrolü, vücut antioksidan aktivitesini artırma, bağırsıklığı artırma ve yaşlanmayı geciktirmedir. Antosiyaninler açısından zengin olan renkli tahıllar, farklı gıda uygulamalarında kısmen yapay renklendiricilerin yerini almak veya bazı kronik hastalıklarla mücadelede yardımcı olmak için fonksiyonel gıda bileşenleri olarak kullanılabilirler. Bugüne kadar renkli tahıllardaki antosiyaninlerin diğer gıda bileşenleri ile etkileşimleri üzerine yeteri kadar çalışma yapılmamıştır. Biyoyararlılığı arttırmak ve insan sindirim sisteminde hedeflenen faydayı sağlamak amacıyla renkli tahılların diyetlerdeki yeri artırılmalıdır. Son zamanlarda sağlığa yararlı ve besince zengin gıdalara yönelik ilginin artması da bu amaca katkı sağlayacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] J. Harbone, A. C. Williams, Anthocyanins and other flavonoides. 15, pp. 631, 1998.

- [2] K. E. Schwinn, K. M. Davies, Flavonoids, in plant pigments and their manipulation. Annual Plant Reviews. Blackwell Publishing, 92, 149, 2004.
- [3] İ. Koca, B. Karadeniz, S. Tural, Antosiyaninlerin antioksidan aktivitesi. Türkiye, 9, 24-26, 2006.
- [4] M. Rein, Copigmentation reactions and color stability of berry anthocyanins, Doctoral dissertation, Helsingin yliopiston, University of Helsinki, 2005.
- [5] M. Paulsmeyer, L. Chatham, T. Becker, M. West, L. West, J. Juvik, Survey of Anthocyanin Composition and Concentration in Diverse Maize Germplasms. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 65(21), 4341-4350, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00771>
- [6] M. T. Escribano-Bailón, C. Santos-Buelga, J. C. Rivas-Gonzalo, Anthocyanins in cereals. Journal of Chromatography A, 1054(1-2), 129-141, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.08.152>
- [7] D. B. Ficco, V. De Simone, A. M. De Leonardi, V. Giovannello, M. A. Del Nobile, L. Padalino, L. Lecce, G. M. Borrelli, P. De Vita, Use of purple durum wheat to produce naturally functional fresh and dry pasta. Food Chemistry, 205, 187-195, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.014>
- [8] M. J. Kim, J. N. Hyun, J. A. Kim, J. C. Park, M. Y. Kim, J. G. Kim, S. J. Lee, S. C. Chun, I. M. Chung, Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 55(12), 4802-4809, 2007. <https://doi.org/10.1021/jf0701943>
- [9] S. L. Dwivedi, A. K. Mattoo, M. Garg, S. Dutt, B. Singh, R. Ortiz, Developing germplasm and promoting consumption of anthocyanin-rich grains for health benefits. Frontiers in Sustainable Food Systems, 6, 867897, 2022. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.867897>
- [10] M. Garg, NABIMG-11-Black (BW/2* PBW621) (IC0620916; INGR17003), a wheat (*Triticum aestivum*) germplasm with black grain color (purple pericarp + blue aleurone). Indian Journal of Plant Genetic Resources, 31, 334-335, 2018.
- [11] M. Garg, NABIMG-10-Purple (BW/2* PBW621) (IC0620915; INGR17002), a wheat (*Triticum aestivum*) germplasm with purple grain (pericarp) color. Indian Journal of Plant Genetic Resources, 333-334, 2018.
- [12] M. Garg, NABIMG-9-Blue; BW/2*/PBW621 (IC0620914; INGR17001), a wheat (*Triticum aestivum*) germplasm with blue grain (aleurone) colour. Indian Journal of Plant Genetic Resources, 332-333, 2018.
- [13] F. Zhu, Anthocyanins in cereals: Composition and health effects. Food Research International (Ottawa, Ont.), 109, 232-249, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.015>
- [14] P. A. Zykina, E. A. Andreeva, A. N. Lykholay, N. V. Tsvetkova, A. V. Voylov, Anthocyanin Composition and Content in Rye Plants with Different Grain Color. Molecules (Basel, Switzerland), 23(4), 948, 2018. <https://doi.org/10.3390/molecules23040948>
- [15] M. Paulsmeyer, J. Juvik, Functional characterization of an anthocyanin dimethyltransferase in maize. Molecules, 26(7), 2020, (2021). <https://doi.org/10.3390/molecules26072020>
- [16] S. Krüger, G. E. Morlock, Fingerprinting and characterization of anthocyanins in 94 colored wheat varieties and blue aleurone and purple pericarp wheat crosses. Journal of Chromatography A, 1538, 75-85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.01.032>
- [17] K. V. Strygina, A. Börner, E. K. Khlestkina, Identification and characterization of regulatory network components for anthocyanin synthesis in barley aleurone. BMC Plant Biology, 17(1), 1-9, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1122-3>
- [18] X. Wu, R. L. Prior, Identification and characterization of anthocyanins by high-performance liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry in common foods in the United States: Vegetables, nuts, and grains. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53(8), 3101-3113, 2005. <https://doi.org/10.1021/jf0478861>
- [19] T. T. Efremova, S. V. Morozov, E. I. Chernyak, E. V. Chumanova, Combining the genes of blue aleurone and purple pericarp in the genotype of spring bread wheat Saratovskaya 29 to increase anthocyanins in grain. Journal of Cereal Science, 109, 103616, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103616>
- [20] M. P. Barbosa, R. de Araújo Miguel, R. R. P. da Conceição, C. N. Kbori, V. A. V. Queiroz, Optimization of extraction, characterization, and stability of the natural pigment from sorghum genotype SC 319. Brazilian Journal of Development, 9(3), 10783-10798, 2023. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n3-126>
- [21] S. Suriano, M. Savino, P. Codianni, A. Iannucci, G. Caternolo, M. Russo, N. Pecchioni, A. Troccoli, Anthocyanin profile and antioxidant capacity in coloured barley. International Journal of Food Science Technology, 54(7), 2478-2486, 2019. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14203>
- [22] O. Y. Tereshchenko, T. A. Pshenichnikova, E. A. Salina, E. K. Khlestkina, Development and molecular characterization of a novel wheat genotype having purple grain colour. Cereal research communications, 40, 210-214, 2012. <https://doi.org/10.1556/CRC.40.2012.2.5>
- [23] V. Taleon, L. Dykes, W. L. Rooney, L. W. Rooney, Effect of genotype and environment on flavonoid concentration and profile of black sorghum grains. Journal of Cereal Science, 56(2), 470-475, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.05.001>
- [24] Q. Zhu, S. Yu, D. Zeng, H. Liu, H. Wang, Z. Yang, X. Xie, R. Shen, J. Tan, H. Li, X. Zhao, Q. Zhang, Y. Chen, J. Guo, L. Chen, Y. G. Liu, Development of "Purple Endosperm Rice" by Engineering Anthocyanin Biosynthesis in the Endosperm with a

- High-Efficiency Transgene Stacking System. *Molecular plant*, 10(7), 918–929, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.05.008>
- [25] H. Wang, D. Liu, Y. Ji, Y. Liu, L. Xu, Y. Guo, Dietary supplementation of black rice anthocyanin extract regulates cholesterol metabolism and improves gut microbiota dysbiosis in C57BL/6J mice fed a high-fat and cholesterol diet. *Molecular Nutrition Food Research*, 64(8), 1900876, 2020. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201900876>
- [26] S. Sharma, P. Khare, A. Kumar, V. Chunduri, A. Kumar, P. Kapoor, P. Mangal, K. K. Kondepudi, M. Bishnoi, M. Garg, Anthocyanin-biofortified colored wheat prevents high-fat diet-induced alterations in mice: nutrigenomics studies. *Molecular Nutrition Food Research*, 64(13), 1900999, 2020. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201900999>
- [27] S. Fabroni, G. Ballistreri, M. Amenta, F.V. Romeo, P. Rapisarda, Screening of the anthocyanin profile and in vitro pancreatic lipase inhibition by anthocyanin-containing extracts of fruits, vegetables, legumes, and cereals. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96, 4713–4723, 2016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7708>
- [28] Y.F. Chen, M.A. Shibu, M.J. Fan, M.C. Chen, V.P. Viswanadha, Y.L. Lin, C.H. Lai, K.H. Lin, T.J. Ho, W.W. Kuo, C.H. Huang, Purple rice anthocyanin extract protects cardiac function in STZ-induced diabetes rat hearts by inhibiting cardiac hypertrophy and fibrosis. *J. Nutr. Biochem.*, 31, 98–105, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2015.12.020>
- [29] W. Chen, D. Müller, E. Richling, M. Wink, Anthocyanin-rich purple wheat prolongs the life span of *Caenorhabditis elegans* probably by activating the DAF-16/FOXO transcription factor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(12), 3047–3053, 2013. <https://doi.org/10.1021/jf3054643>
- [30] Y. Zuo, C. Peng, Y. Liang, K. Y. Ma, H. Yu, H.Y.E. Chan, Z. Y. Chen, Black rice extract extends the lifespan of fruit flies. *Food Function*, 3(12), 1271–1279, 2012. <https://doi.org/10.1039/c2fo30135k>
- [31] G. H. Yıldırım, F. Öner, Mısır danesinin fiziksel ve besinsel yapısı. *Harman Dergisi*, 92, 68-74, 2020.
- [32] F. Lao, M. M. Giusti, Quantification of purple corn (*Zea mays L.*) anthocyanins using spectrophotometric and HPLC approaches: Method comparison and correlation. *Food Analytical Methods*, 9, 1367–1380, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0318-0>
- [33] A. Collison, L. Yang, L. Dykes, S. Murray, J. M. Awika, Influence of Genetic Background on Anthocyanin and Copigment Composition and Behavior during Thermoalkaline Processing of Maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(22), 5528–5538, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00798>
- [34] B. Harakotr, B. Suriharn, R. Tangwongchai, M. P. Scott, K. Lertrat, Anthocyanin, phenolics and antioxidant activity changes in purple waxy corn as affected by traditional cooking." *Food Chemistry*, 164,510-517, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.069>
- [35] G. A. Camelo-Méndez, E. Agama-Acevedo, M. M. Sanchez-Rivera, L. A. Bello-Pérez, Effect on in vitro starch digestibility of Mexican blue maize anthocyanins. *Food Chemistry*, 211, 281-284, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.024>
- [36] S. Zilić, A. Serpen, G. Akilloğlu, V. Gökmen, J. Vančetović, Phenolic compounds, carotenoids, anthocyanins, and antioxidant capacity of colored maize (*Zea mays L.*) kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(5), 1224–1231, 2012. <https://doi.org/10.1021/jf204367z>
- [37] M. P. Georgiana, S. Muste, O. Ranta, A. Molnar, A. D. Păcurar, Anthocyanins in maize (*Zea mays*): composition and health effects-A Review. *Hop Med Plants*, 27(1-2), 50-56, 2019.
- [38] E. Mackon, G. C. J. D. E. Mackon, Y. Ma, M. H. Kashif, N., Ali, B. Usman, P. Liu, Recent insights into anthocyanin pigmentation, synthesis, trafficking, and regulatory mechanisms in rice (*Oryza sativa L.*) caryopsis. *Biomolecules*, 11(3), 394, 2021 <https://doi.org/10.3390/biom11030394>
- [39] S. Jiamyangyuen, N. Nuengchamngong, P. Ngamdee, Bioactivity and chemical components of Thai rice in five stages of grain development. *Journal of Cereal Science*, 74, 136-144, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.01.021>
- [40] M. H. Chen, A. M. McClung, C. J. Bergman, Phenolic content, anthocyanins and antiradical capacity of diverse purple bran rice genotypes as compared to other bran colors. *Journal of Cereal Science*, 77, 110-119, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.07.010>
- [41] J. Hao, H. Zhu, Z. Zhang, S. Yang, H. Li, Identification of anthocyanins in black rice (*Oryza sativa L.*) by UPLC/Q-TOF-MS and their in vitro and in vivo antioxidant activities. *Journal of Cereal Science*, 64, 92–99,2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.05.003>
- [42] M. Zaupe, L. Calani, D. Del Rio, F. Brighenti, N. Pellegrini, Characterization of total antioxidant capacity and (poly) phenolic compounds of differently pigmented rice varieties and their changes during domestic cooking. *Food Chemistry*, 187, 338-347, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.055>
- [43] Y. Shao, F. Xu, X. Sun, J. Bao, T. Beta, Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa L.*). *Journal of Cereal Science*, 59(2), 211–218, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.004>
- [44] M. Bordiga, S. Gomez-Alonso, M. Locatelli, F. Travaglia, J. D. Coisson, I. Hermosin-Gutierrez, M. Arlorio, Phenolics characterization and antioxidant activity of six different pigmented *Oryza sativa L.* cultivars grown in Piedmont (Italy). *Food Research*

- International, 65, 282-290, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.007>
- [45] Z. Hou, P. Qin, Y. Zhang, S. Cui, G. Ren, Identification of anthocyanins isolated from black rice (*Oryza sativa* L.) and their degradation kinetics. Food Research International, 50(2), 691-697, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.037>
- [46] X. Q. Chen, N. Nagao, T. Itani, K. Irifune, Antioxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice. Food Chemistry, 135(4), 2783-2788, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.098>
- [47] T. Frank, B. Reichardt, Q. Shu, K. H. Engel, Metabolite profiling of colored rice (*Oryza sativa* L.) grains. Journal of Cereal Science, 55(2), 112-119, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.09.009>
- [48] M. Hiemori, E. Koh, A. E. Mitchell, Influence of cooking on anthocyanins in black rice (*Oryza sativa* L. japonica var. SBR). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57(5), 1908-1914, 2009. <https://doi.org/10.1021/jf803153z>
- [49] E. S. M. Abdel-Aal, J. C. Young, I. Rabalski, Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54(13), 4696-4704, 2006. <https://doi.org/10.1021/jf0606609>
- [50] P. Goufo, H. Trindade, Rice antioxidants: phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ -oryzanol, and phytic acid. Food Science Nutrition, 2(2), 75-104, 2014. <https://doi.org/10.1002/fsn.3.86>
- [51] M. Garg, M. Chawla, V. Chunduri, R. Kumar, S. Sharma, N. K. Sharma, N. Kaur, A. Kumar, J. K. Munday, M. K. Saini, S. P. Singh, Tane renklerinin elit buğday çeşitlerine aktarılması ve karakterizasyonu. Journal of Cereal Science, 71:138-44, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.08.004>
- [52] D. B. Ficco, V. De Simone, S. A. Colecchia, I. Pecorella, C. Platani, F. Nigro, F. Finocchiaro, R. Papa P. De Vita, Genetic variability in anthocyanin composition and nutritional properties of blue, purple, and red bread (*Triticum aestivum* L.) and durum (*Triticum turgidum* L. ssp. *turgidum* convar. *durum*) wheats. Journal of agricultural and food chemistry, 62(34), 8686-8695, 2014. <https://doi.org/10.1021/jf5003683>
- [53] A. C. Zeven, Wheats with purple and blue grains: A Review. Euphytica, 56, 243-258, 1991.
- [54] V. Burešová, D. Kopecký, J. Bartoš, P. Martinek, N. Watanabe, T. Vyhnanek, J. Doležel, Variation in genome composition of blue-aleurone wheat. Theoretical and Applied Genetics, 128, 273-282, 2015.
- [55] L. A. Morrison, R. J. Metzger, A. J. Lukaszewski, Origin of the blue-aleurone gene in Sebesta Blue wheat genetic stocks and a protocol for its use in apomixis screening. Crop Science, 44(6), 2063-2067, 2004. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.2063>
- [56] T. N., Er, N. Y. Ayhan, Bazı yerel buğday türlerinin ve kefirin ekmek yapımında kullanımı. Toros University Journal of Food Nutrition and Gastronomy, 2(1), 43-51, 2023.
- [57] S. Kaur, N. Sharma, P. Kapoor, V. Chunduri, AK. Pandey, M. Garg, Spotlight on the overlapping routes and partners for anthocyanin transport in plants. Physiologia Plantarum 2021, 171(4): 868-881 <https://doi.org/10.1111/pp1.13378>
- [58] M. Garg, S. Kaur, A. Sharma, A. Kumari, V. Tiwari, S. Sharma, P. Kapoor, M. Krishania, Rising demand for healthy foods-anthocyanin biofortified colored wheat is a new research trend. Frontiers in Nutrition, 9, 878221, 2022. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.878221>
- [59] A. Brandolini, A. Hidalgo, S. M. Chemical composition of wild and feral diploid wheats and their bearing on domesticated wheats. Journal of Cereal Science, 63, 122-127, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.03.005>
- [60] C. E. Tyl, M. Bunzel, Antioxidant activity-guided fractionation of blue wheat (*UC66049 Triticum aestivum* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 60, 731-739, 2012. <https://doi.org/10.1021/jf203648x>
- [61] E. S. M. Abdel-Aal, A. A. Abou-Arab, T. H. Gamel, P. J. Hucl, C. Young, I. Rabalski, Fractionation of blue wheat anthocyanin compounds and their contribution to antioxidant properties. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56, 11171-11177, 2008.
- [62] C. Lee, D. Han, B. Kim, N. Baek, B. K. Baik, Antioxidant and anti-hypertensive activity of anthocyanin-rich extracts from hullless pigmented barley cultivars. International Journal of Food Science technology, 48(5), 984-991, 2013. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12050>
- [63] Z. Liu, Y. Liu, Z. Pu, J. Wang, Y. Zheng, Y. Li, Y. Wei, Regulation, evolution, and functionality of flavonoids in cereal crops. Biotechnology Letters, 35, 1765-1780, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10529-013-1277-4>
- [64] G. Mazza, L. Gao, Blue and purple grains. In: Specialty Grains for Food and Feed (edited by E. Abdel-Aal P. Wood). Pp. 45-67 St Paul: AACC International Inc. 2005.
- [65] J. M. Pihlava, J. Hellström, T. Kurtelius, P. Mattila, Flavonoids, anthocyanins, phenolamides, benzoxazinoids, lignans and alkylresorcinols in rye (*Secale cereale*) and some rye products. Journal of Cereal Science, 79, 183-192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.09.009>
- [66] W. Dedio, R. D. Hill, L. E. Evans, Anthocyanins in the Pericarp and Coleoptiles of Purple-Seeded Rye. Canadian Journal of Plant Science, 52(6), 981-983, 1972. <https://doi.org/10.4141/cjps72-168>

- [67] D. H. Rhodes, L. Hoffmann, Jr, W. L. Rooney, P. Ramu, G. P. Morris, S. Kresovich, Genome-wide association study of grain polyphenol concentrations in global sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] germplasm. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(45), 10916–10927, 2014. <https://doi.org/10.1021/jf503651t>
- [68] S. C. Choi, J. M. Kim, Y. G. Lee, C. Kim, Antioxidant activity and contents of total phenolic compounds and anthocyanins according to grain colour in several varieties of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Cereal Research Communications*, 47, 228-238, 2019. <https://doi.org/10.1556/0806.47.2019.14>
- [69] A. Khoddami, M. Mohammadrezaei, T. H. Roberts, Effects of sorghum malting on colour, major classes of phenolics and individual anthocyanins. *Molecules*, 22(10), 1713, 2017. <https://doi.org/10.3390/molecules22101713>
- [70] L. Dykes, L. W. Rooney, Phenolic compounds in cereal grains and their health benefits. *Cereal Foods World*, 52(3), 105-111, 2007.
- [71] L. Dykes, L. W. Rooney, R. D. Waniska, W. L. Rooney, Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(17), 6813-6818, 2005. <https://doi.org/10.1021/jf050419e>
- [72] J. M. Awika, L. W. Rooney, R. D. Waniska, Properties of 3-deoxyanthocyanins from sorghum. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(14), 4388-4394, 2004. <https://doi.org/10.1021/jf049653f>
- [73] L. E. Pinilla, Utilization of Sorghum in El Salvador: Grain, Flour and End-Product Quality, Doctoral dissertation, Texas A & M University, 2012.
- [74] J. R. Taylor, K. G. Duodu, Effects of processing sorghum and millets on their phenolic phytochemicals and the implications of this to the health-enhancing properties of sorghum and millet food and beverage products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(2), 225-237, 2015. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6713>
- [75] L. Yang, J. D. Browning, J. M. Awika, Sorghum 3-deoxyanthocyanins possess strong phase II enzyme inducer activity and cancer cell growth inhibition properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(5), 1797-1804, 2009. <https://doi.org/10.1021/jf8035066>
- [76] L. De Moraes Cardoso, T. A. Montini, S. S. Pinheiro, H. M. Pinheiro-Sant'Ana, H. S. D. Martino, A. V. B. Moreira, (2014). Effects of processing with dry heat and wet heat on the antioxidant profile of sorghum. *Food Chemistry*, 152, 210-217, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.106>
- [77] B. Harakotr, B. Suriharn, M. P. Scott, K. Lertrat, Genotypic variability in anthocyanins, total phenolics, and antioxidant activity among diverse waxy corn germplasm. *Euphytica*, 203, 237–248, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1240-z>
- [78] A. N. Nankar, B. Dungan, N. Paz, N. Sudasinghe, T. Schaub, F. O. Holguin, R. C. Pratt, Quantitative and qualitative evaluation of kernel anthocyanins from southwestern United States blue corn. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(13), 4542–4552, 2016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7671>
- [79] G. Pereira-Caro, S. Watanabe, A. Crozier, T. Fujimura, T. Yokota, H. Ashihara, Phytochemical profile of a Japanese black–purple rice. *Food Chemistry*, 141, 2821–2827, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.100>
- [80] G. Pereira-Caro, G. Cros, T. Yokota, A. Crozier, Phytochemical profiles of black, red, brown, and white rice from the Camargue region of France. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, 7976–7986, 2013. <https://doi.org/10.1021/jf401937b>
- [81] S. Sharma, P. Khare, A. Kumar, V. Chunduri, A. Kumar, P. Kapoor, P. Mangal, K. K. Kondepudi, M. Bishnoi, M. Garg, Anthocyanin-biofortified colored wheat prevents high fat diet–induced alterations in mice: nutrigenomics studies. *Molecular Nutrition Food Research*, 64(13), 1900999, 2020. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201900999>
- [82] E. S. M. Abdel-Aal, P. Hucl, I. Rabalski, Compositional and antioxidant properties of anthocyanin-rich products prepared from purple wheat. *Food Chemistry*, 254, 13-19, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.170>
- [83] S. Žilić, D. Dodig, J. Vančetović, N. Grčić, V. Perić, P. Titan, V. Maksimović, Composition of anthocyanins in colored grains and the relationship of their non-acylated and acylated derivatives. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 69(2), 137-146, 2019. <https://doi.org/10.31883/pjfn-2019-105100>
- [84] J. Lachman, P. Martinek, Z. Kotíková, M. Orsák, M. Šulc, Genetics and chemistry of pigments in wheat grain—A review. *Journal of Cereal Science*, 74, 145-154, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.007>
- [85] P. Bartl, A. Albrecht, M. Skrt, B. Tremlová, M. Ošťádalová, K. Šmejkal, I. Vovk, N. P. Ulrih, Anthocyanins in purple and blue wheat grains and in resulting bread: Quantity, composition, and thermal stability. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 66(5), 514-519, 2015. <https://doi.org/10.3109/09637486.2015.1056108>
- [86] D. C. Knievel, E. S. Abdel-Aal, I. Rabalski, T. Nakamura, P. Hucl, Grain color development and the inheritance of high anthocyanin blue aleurone and purple pericarp in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Cereal Science*, 50(1), 113-120, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.03.007>
- [87] F. S. Hosseinian, W. Li, and T. Beta, Measurement of anthocyanins and other phytochemicals in purple wheat, *Food Chemistry*, 109.4 916-924, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.083>
- [88] I. Diczházi, L. Kursinszki, Anthocyanin Content and Composition in Winter Blue Barley Varieties and

- Lines. Journal of Grain Chemistry, 91(2), 195–200, 2014. <https://doi.org/10.1094/cchem-05-13-0091-r>
- [89] H. M. Jin, B. Dang, W. G. Zhang, W. C. Zheng, X. J. Yang, Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors. *Molecules*, 27(11), 3411, 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27113411>
- [90] L. Dykes, L. M. Seitz, W. L. Rooney, L. W. Rooney, Flavonoid composition of red sorghum genotypes. *Food Chemistry*, 116(1), 313–317, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.052>
- [91] J. M. Awika, L. W. Rooney, R. D. Waniska, Anthocyanins from black sorghum and their antioxidant properties. *Food Chemistry*, 90(1-2), 293-301, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.058>
- [92] A. V. Rusu, C. T. Socol, S. P. Bangar, V. Coşier, M. Trif, Colored cereals: Genetics and chemistry of pigments. In *Functionality and Application of Colored Cereals*, Academic Press, pp. 111-134, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99733-1.00001-7>
- [93] A. Francavilla, I. J. Joye, Anthocyanins in whole grain cereals and their potential effect on health. *Nutrients*, 12(10), 2922, 2020. <https://doi.org/10.3390/nu12102922>
- [94] R. Ö. Aydın, S. Z. A. Köseoğlu, Mor Pigmentli Meyve ve Sebzelelerin Kanser ile İlişkinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 485-491, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1114648>
- [95] M. A. Tikhonova, O. Y. Shoeva, M. V. Tenditnik, M. V. Ovsyukova, A. A. Akopyan, N. I. Dubrovina, T. G. Amstislavskaya, Khlestkina, E. K. Evaluating the effects of grain of isogenic wheat lines differing in the content of anthocyanins in mouse models of neurodegenerative disorders. *Nutrients*, 12(12), 3877, 2020. <https://doi.org/10.3390/nu12123877>
- [96] N. Sharma, A. Kumari, V. Chunduri, S. Kaur, J. Banda, A. Goyal, M. Garg, Anthocyanin biofortified black, blue and purple wheat exhibited lower amino acid cooking losses than white wheat. *LWT*, 154, 112802, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112802>
- [97] M. A. Tikhonova, O. Y. Shoeva, M. V. Tenditnik, A. A. Akopyan, E. A. Litvinova, N. A. Popova, T.G. Amstislavskaya, E. K. Khlestkina, Antitumor Effects of an Anthocyanin-Rich Grain Diet in a Mouse Model of Lewis Lung Carcinoma. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11), 5727, 2024. <https://doi.org/10.3390/ijms25115727>
- [98] F. Zhu, Interactions between starch and phenolic compound. *Trends in Food Science and Technology*, 43(2), 129–143, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.003>
- [99] F. Zhu Interactions between cell wall polysaccharides and polyphenols. *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 58(11), 1808–1831, 2018b. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1287659>
- [100] M. Hidalgo, M. J. Oruna-Concha, S. Kolida, G. E. Walton, S. Kallithraka, et al. Metabolism of anthocyanins by human gut microflora and their influence on gut bacterial growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 3882–3890, 2012. <https://doi.org/10.1021/jf3002153>
- [101] J. Prokop, P. Anzenbacher, E. Mrkvicová, L. Pavlata, I. Zapletalová, O. Šťastník, P. Martinek, P. Kosina, E. Anzenbacherová, In vivo evaluation of effect of anthocyanin-rich wheat on rat liver microsomal drug-metabolizing cytochromes P450 and on biochemical and antioxidant parameters in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 122, 225-233, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.10.029>
- [102] E. Mrkvicová, L. Pavlata, F. Karásek, O. Šťastník, E. Doležalová, V. Trojan, T. Vyhnanek, L. Hřivna, V. Holeksová, J. Mareš, T. Brabec, P. Horký, B. Ruttkey-Nedecký, V. Adam, R. Kizek, The influence of feeding purple wheat with higher content of anthocyanins on antioxidant status and selected enzyme activity of animals. *Acta Veterinaria Brno*, 85(4), 371-376, 2017. <https://doi.org/10.2754/avb201685040371>
- [103] Y. Liu, J. Qiu, Y. Yue, K. Li, G. Ren, Dietary black-grained wheat intake improves glycemic control and inflammatory profile in patients with type 2 diabetes: A randomized controlled trial. *Therapeutics And Clinical Risk Management*, 247-256, 2018. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S151424>
- [104] T. H. Gamel, A. J. Wright, A. J. Tucker, M. Pickard, I. Rabalski, M. Podgorski,... E. S. M. Abdel-Aal, Absorption and metabolites of anthocyanins and phenolic acids after consumption of purple wheat crackers and bars by healthy adults. *Journal of Cereal Science*, 86, 60-68, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.11.017>
- [105] K. Petroni, R. Pilu, C. Tonelli, Anthocyanins in corn: a wealth of genes for human health. *Planta*, 240(5), 901–911, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2131-1>
- [106] P. Suganyadevi, K. M. Saravanakumar, S. Mohandas, The antiproliferative activity of 3-deoxyanthocyanins extracted from red sorghum (*Sorghum bicolor*) bran through P53-dependent and Bcl-2 gene expression in breast cancer cell line. *Life Sciences*, 92, 379–382, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2013.01.006>
- [107] D. A. Urias-Lugo, J. B. Heredia, M. D. Muy-Rangel, J. B. Valdez-Torres, S. O. Serna-Saldívar, J. A. Gutiérrez-Urbe, Anthocyanins and phenolic acids of hybrid and native blue maize (*Zea mays L.*) extracts and their antiproliferative activity in mammary (MCF7), liver (HepG2), colon (Caco2 and HT29) and prostate (PC3) cancer cells. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70, 193–199, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11130-015-0479-4>
- [108] S. Thummayot, C. Tocharus, D. Pinkaew, K. Viwatpinyo, K. Sringarm, J. Tocharus,

- Neuroprotective effect of purple rice extract and its constituent against amyloid beta-induced neuronal cell death in SK-N-SH cells. *NeuroToxicology*, 45, 149–158, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2014.10.010>
- [109] M. Y. Um, J. Ahn, T. Y. Ha, Hypolipidaemic effects of cyanidin 3-glucoside rich extract from black rice through regulating hepatic lipogenic enzyme activities. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93, 3126–3128, 2013. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6070>
- [110] Y. Yang, M. C. Andrews, Y. Hu, D. Wang, Y. Qin, et al. Anthocyanin extract from black rice significantly ameliorates platelet hyperactivity and hypertriglyceridemia in dyslipidemic rats induced by high fat diets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 6759–6764, 2011. <https://doi.org/10.1021/jf201079h>
- [111] X. Lu, Y. Zhou, T. Wu, L. Hao, Ameliorative effect of black rice anthocyanin on senescent mice induced by D-galactose. *Food Function*, 5, 2892–2897, 2014.
- [112] X. Jiang, H. Guo, T. Shen, X. Tang, Y. Yang, W. Ling, Cyanidin-3-O- β -glu-coside purified from black rice protects mice against hepatic fibrosis induced by carbon tetrachloride via inhibiting hepatic stellate cell activation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63, 6221–6230, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02181>
- [113] Y. Shen, H. Zhang, L. Cheng, L. Wang, H. Qian, X. Qi, In vitro and in vivo antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley. *Food Chemistry*, 194, 1003–1012, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.083>

